

SÉRIE A, N° 2758
N° D'ORDRE : 3631

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

EUGÈNE LE BORGNE

AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ
PROFESSEUR AU LYCÉE DE PONTIVY

1^{re} THÈSE

SUR LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE DU SOL

2^e THÈSE

Propositions données par la Faculté

L'ÉTUDE DES ANOMALIES MAGNÉTIQUES DE LA BRETAGNE CENTRALE.

Soutenues le 30 Mars 1955, devant la Commission d'Examen

<i>Jury</i> {	MM. Y. ROGARD	} <i>Président.</i>	
	E. THELLIER		} <i>Examineurs.</i>
	L. CAGNIARD		
	S. HENIN		

Sur la susceptibilité magnétique du sol



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553821_0015

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

EUGÈNE LE BORGNE

AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ
PROFESSEUR AU LYCÉE DE PONTIVY

1^{re} THÈSE

SUR LA SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE DU SOL

2^e THÈSE

Propositions données par la Faculté

L'ÉTUDE DES ANOMALIES MAGNÉTIQUES DE LA BRETAGNE CENTRALE.

Soutenues le 30 Mars 1955, devant la Commission d'Examen

<i>Jury</i> {	MM. Y. ROCARD	} <i>Président.</i>	
	E. THELLIER		} <i>Examineurs.</i>
	L. CAGNIARD		
	S. HENIN		



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen J. PÉRÉS

Professeurs

G. JULIA	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure	FORTIER	T Mécanique expérimentale des fluides
A. DENJOY	T Théorie des Fonctions	DANJON	T Astronomie
L. LUTAUD	T Géographie physique et Géologie dynamique	FROMAGEOT	T Chimie biologique
E. DARMOIS	T Enseignement de Physique	LAPORTE	T Physique générale et Radioact.
R. LEVY	T Physiologie comparée	JANET	T Mécanique analytique et Mécanique céleste
FOCH	T Mécanique physique et exper.	PETIT	T Biologie maritime
PAUTHENIER	T Electrotechnique générale	QUENEY	T Météorologie et dynamique atmosphérique
De BROGLIE	T Théories physiques	GALLIEN	T Embryologie
JOB	T Chimie générale	EICHHORN	T Biologie végétale (P.C.B.)
PRENANT	T Anatomie et Histologie comparées.	DE CUGNAC	T Biologie végétale (P.C.B.)
GARNIER	T Géométrie supérieure	MleCAUCHOIS	T Chimie physique
PERES	T Mécanique des fluides et applications	THELLIER	T Physique du Globe
LAUGIER	T Physiologie générale	AUDUBERT	T Electrochimie
M. CURIE	T Physique (P. C. B.)	L'HERITIER	T Génétique
VALIRON	T Calcul différentiel et int.	GRIVET	T Radioélectricité
BARRABE	T Géologie structurale et Géologie appliquée.	PONCIN	T Mécanique des fluides
G. DARMOIS	T Calcul des probabilités et Physique mathématique.	THIRY	T Mécanique appliquée
J.BOURCART	T Géographie physique et Géologie dynamique.	DUBREIL	T Arithmétique et théorie des nombres
Mme JOLIOT CURIE	T Physique nucléaire et Radioactivité	QUELET	T Chimie organique
PLANTEFOL	T Botanique	CAGNIARD	T Géophysique appliquée
CABANNES	T Recherches physiques	CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
GRASSE	T Evolution des êtres organisés	CUVILLIER	T Géol. structurale et Géologie Appliquée
PREVOST	T Chimie organique	JUNG	T Pétrographie
BOULIGAND	T Application de l'analyse à la Géométrie	TRILLAT	T Chimie physique
CHAUDRON	T Chimie appliquée	WIEMANN	T Chimie (M. P. C.)
WYART	T Minéralogie	JACQUINOT.	T Spectroscopie et Physique céleste
TEISSIER	T Zoologie	VASSY	Physique de l'atmosphère
MANGENOT	T Biologie végétale	DESTOUCHES	Théories physiques
P. AUGER	T Physique quantique et relativité	M. PRUVOST	T Géologie
MONNIER	T Physiologie des fonctions	AMIEL	T Chimie (P. C. B.)
PIVETEAU	T Géologie	HOCART	T Minéralogie
ROCARD	T Physique (E. N. S.)	J.P.MATHIEU	T Physique (P. C. B.)
H. CARTAN	T Mathématiques (E.N.S.)	COUTEAUX	T Biologie animale (P.C.B.)
LAFFITTE	T Chimie générale	MAY	T Biologie animale (P.C.B.)
FAVARD	T Mécanique générale	CHOQUET	T Calcul différentiel et intégral
COULOMB	T Physique du Globe	FELDMANN	T Biologie (P. C. B.)
Mle COUSIN	T Biologie animale (P.C.B.)	GUINIER	T Physique (P. C. B.)
CHRETIEN	T Chimie minérale	JOST	T Biologie (P. C. B.)
P. DRACH	T Zoologie	FORTET	Calcul des Probabilités
KASTLER	T Physique	SCHWARTZ	T Méthode math. de la Physique
EPHRUSSI	T Génétique	CHOUARD	T Physiologie végétale
WURMSER	T Biol. physico-chimique	MALAVARD	T Aviation
RIVIERE	T Géologie (S. P. C. N.)	BRELOT	T Calcul différentiel
GAUTHERET	T Biologie végétale	NORMANT	T Chimie (P. C. B.)
LUCAS	T Physique	BENARD	T Chimie (P. C. B.)
A. THOMAS	T Biologie cellulaire	BUVAT	Botanique (E. N. S.)
ARNULF	T Optique appliquée.	DUGUE	Statistique mathématique
Max MORAND	Physique	GELOSO	Chimie (P. C. B.)
SOLEILLET	T Physique	SOULAIRAC	Psychophysiologie
		ULRICH	Physiologie végétale
		MARECHAL	Optique théorique et appliquée
		KIRRMANN	T Théories chimiques

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Pages</u>
Introduction	3
 CHAPITRE I	
GÉNÉRALITÉS SUR LE SOL	5
Altération des roches	
Formation et évolution du sol	
 CHAPITRE II	
AIMANTATION INDUITE DES ROCHES	7
Aimantation induite des minéraux :	
définitions, susceptibilité magnétique des minéraux, influence	
de la forme des grains sur leur susceptibilité apparente	
Aimantation induite des roches	
 CHAPITRE III	
MÉTHODES UTILISÉES POUR LES MESURES	12
Appareil à induction, précision des mesures	
Magnétomètre astatique symétrique, précision des mesures	
Viscosité magnétique des échantillons	
Variation de la susceptibilité en fonction du champ	
 CHAPITRE IV	
SUSCEPTIBILITÉ DES DIFFÉRENTES COUCHES DU SOL	19
Prélèvement et préparation des échantillons	
Comparaison de trois profils voisins	
Profils correspondant à des roches-mères différentes	
Profils relevés dans des régions différentes	
Cas des sols de faible épaisseur	
Sols développés sur des alluvions magnétiques anciennes	
Sols enterrés	
Susceptibilité et teneur en fer des différentes couches	
Conclusion	
 CHAPITRE V	
SUSCEPTIBILITÉ DE L'HORIZON HUMIFÈRE SUPÉRIEUR	27
Susceptibilité de la couche superficielle humifère dans la Bre-	
tagne Centrale	
Influence des conditions d'humidité sur la susceptibilité des	
sols en place	
Conclusion	
 CHAPITRE VI	
FRACTIONNEMENT DU SOL	32
Triage magnétique grossier, examen minéralogique de la fraction	
attirable	
Analyse granulométrique du sol	

Susceptibilité des différentes fractions	
Influence des traitements de l'analyse mécanique sur les propriétés magnétiques	
Cas de deux horizons d'un même profil	
Cas de sols humides et de sols secs voisins	
Cas d'un fond de thalweg pollué	
Susceptibilité de la fraction «pierres et graviers»	
Viscosité magnétique des différentes fractions.	
Conclusion	

CHAPITRE VII

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES PRODUITS D'ALTÉRATION DES ROCHES	42
Altération d'un Gabbro	
Altération d'une amphibolite, de diabases	
Latérites	
Conclusion	

CHAPITRE VIII

CONSTITUANT MAGNÉTIQUE DE LA FRACTION ARGILEUSE DU SOL	47
Propriétés de ce constituant	
Propriétés des oxydes de fer: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ferrites, magnétites substituées	
Préparation et propriétés des précipités Fe^{+++} , Fe^{++}	
Précipitation d'un mélange Fe^{+++} , Fe^{++} sur une terre peu magnétique	
Conclusion	

CHAPITRE IX

CONSTITUANTS MAGNÉTIQUES DE LA FRACTION «SABLES» DU SOL, ÉVOLUTION DE LA SUSCEPTIBILITÉ DES FRAGMENTS DE LA ROCHE-MÈRE AU COURS DE LEUR ALTÉRATION DANS LE SOL	59
Susceptibilité des fragments de roches en contact avec le sol	
Altération d'un granite dans une case lysimétrique	
Conclusion	

CHAPITRE X

FORMATION D'UN PRODUIT MAGNÉTIQUE DANS LE SOL	63
Susceptibilité du sol et concentration en matières organiques	
Influence des fermentations des matières organiques sur l'évolution du fer dans le sol	
Étude expérimentale de l'influence des fermentations sur la susceptibilité du sol:	
I) traitement par percolation II) alternatives humectation-dessiccation, III) fermentation activée sur des sols en place	
Mécanisme de la formation d'un produit magnétique	
Conclusion	

CHAPITRE XI

INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU SOL SUR LES ÉLÉMENTS DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE	72
Résumé et conclusions	76
Bibliographie.	80

Introduction

Au cours de mesures effectuées en vue d'établir le réseau magnétique de la France, C. MAURAIN avait constaté que la Bretagne Centrale se comporte d'une manière anormale (39). Partant de ces observations, j'avais d'abord cherché à délimiter la région perturbée à l'aide d'une balance de SCHMIDT (34), puis j'avais tracé les courbes isanomales relatives à quelques anomalies (35).

En vue d'interpréter ces anomalies locales j'ai recueilli des échantillons des différentes roches que l'on rencontre dans la région au voisinage de la surface: la susceptibilité magnétique et l'aimantation rémanente sont très faibles pour toutes ces roches, granites, schistes, micaschistes, grès, sauf pour quelques diabases auxquelles certaines anomalies sont étroitement associées.

Sur le terrain il est déjà possible d'apprécier grossièrement les propriétés magnétiques d'une roche en approchant un échantillon de la balance de SCHMIDT: j'ai remarqué ainsi que des pierres prélevées dans le sol provoquaient une déviation appréciable du fléau lorsqu'elles étaient enrobées de terre et n'avaient plus d'influence sensible lorsque la terre était détachée; au contraire, en approchant une poignée de terre j'obtenais une déviation très nette. A la suite de cette observation, l'expérience, répétée dans chaque station, a montré que le phénomène n'est pas localisé: les propriétés magnétiques de la couche superficielle du sol sont généralement beaucoup plus marquées que celles de la roche-mère sous-jacente.

Cette propriété du sol, localisée dans une couche superficielle de 20 à 30 cm. d'épaisseur, ne peut apporter que des modifications de détail aux éléments du champ magnétique terrestre; cependant, comme elle présente un caractère général, je me suis efforcé d'en rechercher l'origine.

Les propriétés magnétiques des roches, à cause de leur intérêt dans la prospection ou dans la reconstitution de l'histoire du champ terrestre, ont fait l'objet d'un grand nombre de travaux. Quelques auteurs ont signalé que la susceptibilité des produits d'altération est souvent très différente de celle de la roche fraîche mais on ne dispose pas de renseignements concernant les propriétés magnétiques du sol proprement dit, où la présence de matières organiques crée des conditions particulières pour la transformation des minéraux.

Avant d'aborder l'étude de la susceptibilité du sol je rappellerai comment celui-ci s'est formé à partir d'une roche-mère et je résumerai les résultats obtenus par différents auteurs concernant l'aimantation induite des roches à la température ordinaire et dans des champs faibles.

Les appareils que j'ai utilisés pour les déterminations de susceptibilité, appareil à induction et magnétomètre, ont été construits par E. THELLIER à l'Institut de Physique du Globe de Paris (51); je me bornerai à indiquer la précision des mesures auxquelles j'ai procédé. Toutes les mesures ont été effectuées à la température ordinaire et dans des champs de l'ordre d'une dizaine d'oersteds. Pour des raisons de commodité les susceptibilités sont rapportées à 1 g. de substance (susceptibilité massique χ); elles sont évaluées le plus souvent en 10^{-6} u. e. m.

Dans les observations relatives à la susceptibilité des sols en place je distinguerai la variation en profondeur, susceptibilité des différentes couches, et la variation en surface, susceptibilité de la couche superficielle en des lieux différents.

En vue d'identifier les constituants responsables des propriétés magnétiques du sol j'ai été amené à étudier les différentes fractions fournies par l'analyse granulométrique, puis à comparer leur comportement à celui des oxydes de fer et à celui des sables magnétiques résultant de l'altération des roches.

Les propriétés magnétiques du sol se rattachent à un problème plus général qui est celui de l'évolution du fer dans le sol; ce problème est très important en pédologie, la formation des latérites en constitue un des aspects. La méthode expérimentale mise au point par S. HENIN et R. BETREMIEUX pour accélérer cette évolution (29) a été utilisée ici dans le but de préciser les conditions de la formation d'une substance magnétique dans le milieu naturel.

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur E. THELLIER, Directeur de l'Observatoire du Parc Saint-Maur. Monsieur THELLIER a mis à ma disposition les appareils qu'il a créés et m'a constamment apporté l'aide la plus large. Je lui exprime ici ma profonde et respectueuse reconnaissance.

Monsieur le Doyen C. MAURAIN a bien voulu s'intéresser à mes recherches; qu'il me soit permis de lui exprimer ma respectueuse gratitude ainsi qu'à Monsieur J. COULOMB, Directeur de l'Institut de Physique du Globe de Paris, qui a suivi mon travail et mis à ma disposition les appareils de l'Institut.

Cette étude sur les propriétés magnétiques du sol n'aurait pu être développée sans l'aide qui m'a été apportée par Monsieur S. HENIN, Directeur du Laboratoire des Sols au Centre National de Recherches Agronomiques. Monsieur HENIN m'a conseillé tout au long de ces recherches et m'a procuré un grand nombre d'échantillons. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma très vive reconnaissance. Je remercie également ses collaborateurs du Laboratoire des Sols auprès de qui j'ai trouvé l'accueil le plus amical.

Au cours de ce travail j'ai bénéficié de l'aide de nombreux autres savants. Je remercie particulièrement: Mademoiselle S. CAILLIERE, sous-Directrice du Laboratoire dirigé au Muséum par Monsieur le Professeur ORCEL, qui a bien voulu me confier des échantillons, et ses collaborateurs qui se sont chargés des analyses thermiques différentielles et des diagrammes de rayons X; Monsieur C. GUILLAUD, Directeur du

Laboratoire du Magnétisme à Bellevue, et Monsieur A. MICHEL, Professeur à la Faculté de Lille, qui m'ont fourni des produits de leurs laboratoires; Monsieur R. FORRER, de la Faculté de Strasbourg, qui a bien voulu procéder à un examen de mes échantillons.

Les renseignements concernant la géologie de la Bretagne Centrale m'ont été communiqués par Monsieur le Doyen Y. MILON, Directeur de l'Institut de Géologie de Rennes, et Mademoiselle S. DURAND, Chef de travaux à la Faculté.

Monsieur le Professeur L. BERTHOIS, de l'Ecole Nationale d'Agriculture, s'est chargé de plusieurs examens minéralogiques.

Monsieur le Professeur H. LE MOAL, de la Faculté de Rennes, m'a prêté le concours le plus amical.

Dans le Laboratoire de Monsieur THELLIER, Mademoiselle J. ROQUET m'a apporté une collaboration très précieuse.

Le C. N. R. S. a bien voulu m'accorder des subventions pour mes déplacements.

A tous j'exprime ma grande reconnaissance.

CHAPITRE I

Généralités sur le sol

Dans son ouvrage sur la dynamique du sol (18) A. DEMOLON donne du sol la définition suivante:

«Le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques.»

Les roches sont des agrégats de minéraux en fragments de formes et de dimensions variées. Selon qu'il s'agit de roches ignées, de roches métamorphiques ou de roches sédimentaires, l'association des divers éléments est plus ou moins rigide mais, dans l'ensemble, les constituants essentiels appartiennent à un petit nombre d'espèces.

Au point de vue chimique les roches sont constituées principalement par de la silice libre ou combinée à des oxydes dont les plus abondants sont Al_2O_3 , Fe_2O_3 et FeO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 ; le mica noir, les amphiboles, les pyroxènes et les périclites contiennent du fer en proportion notable. Les roches renferment également, parfois en proportions non négligeables, des combinaisons telles que des oxydes, des sulfures et des carbonates.

Altération des roches. Sous l'action mécanique et physique de facteurs variés, eau, vent, température, les roches superficielles se désagrègent et s'émiettent: A cette désagrégation mécanique, facilitée par elle, s'ajoute une action chimique où le rôle essentiel revient à l'eau. Des minéraux comme le feldspath s'hydratent, puis s'hydrolysent avec formation de silicates alumineux du type des argiles et élimination des hydroxydes basiques. Sous les climats chauds et humides cette décomposition peut aller plus loin, l'argile perdant de la silice pour donner de l'alumine hydratée (latéritisation). La transformation, lente avec l'eau pure, devient plus rapide lorsque l'eau est chargée de gaz carbonique ou de sels en dissolution.

D'une manière générale les silicates sont plus ou moins transformés par cette hydrolyse et les analyses effectuées sur les roches fraîches et sur les produits d'altération décèlent des pertes importantes en oxydes fortement basiques comme K_2O , Na_2O , CaO , MgO et, souvent, en silice. L'alumine est beaucoup moins mobile et sa concentration augmente, en général, lorsque les roches s'altèrent "in situ". La mobilité du fer varie suivant les conditions : la teneur en fer des produits d'altération est souvent plus élevée que celle de la roche intacte (6), (17), (18), (31), (45).

Aux modifications de la composition provoquées par la dissolution et l'entraînement de certaines combinaisons peuvent s'ajouter des effets dus à l'érosion, qu'il s'agisse de pertes ou d'apports étrangers.

L'examen d'une coupe verticale du sol montre qu'il s'est formé parfois aux dépens des produits fournis par l'altération d'une roche compacte sous-jacente, mais on constate souvent qu'il provient de sédiments variés dont la roche superficielle initiale a été recouverte : ces sédiments peuvent être considérés ici comme des roches-mères.

Formation et évolution du sol. Avec le développement des végétaux le sol s'est constitué progressivement sur les matériaux fournis par l'altération des roches ; la transformation des substances minérales s'est poursuivie, activée et souvent modifiée par la présence de matières organiques et d'organismes vivants. Parmi les effets très complexes des matières organiques signalons qu'elles favorisent le déplacement de certaines combinaisons comme l'argile et l'oxyde ferrique.

Les migrations qui se produisent dans le sol, accompagnées de l'accumulation des éléments entraînés à certains niveaux, permettent de distinguer dans la coupe verticale, ou profil, d'un sol développé une succession de couches différenciées, ou horizons, depuis la surface jusqu'à la roche-mère. Ce profil dépend des conditions d'évolution du sol et en résume l'histoire. Une évolution complète exige une longue période sans perturbations : le sol sera peu développé sur des alluvions récentes ou sur les pentes travaillées par l'érosion. La culture a pour effet d'atténuer les caractères distinctifs des différentes couches, même dans les horizons inférieurs.

La disposition des différents horizons est liée étroitement aux déplacements de l'argile et du fer : ces déplacements sont utilisés pour la classification des sols. Sous les climats tempérés on assiste généralement à une migration du fer vers les horizons inférieurs.

CHAPITRE II

Aimantation induite des roches

Dans une publication récente (53) E. THELLIER a fait une mise au point des connaissances acquises sur le comportement des roches au point de vue magnétique.

Soumises à l'influence d'un champ magnétique la plupart des roches s'aimantent en première approximation, comme des substances paramagnétiques. Cependant l'hystérésis est parfois assez importante et certaines roches, généralement d'origine volcanique, conservent après la suppression du champ magnétisant une aimantation rémanente appréciable. En outre ces roches présentent le phénomène de thermorémanence, c'est à dire qu'elles prennent une aimantation relativement importante et stable si, après les avoir chauffées, on les laisse refroidir dans un champ constant.

Etant donnée l'orientation de mes recherches, je retiendrai surtout les résultats relatifs à l'aimantation induite, provoquée par un champ faible à la température ordinaire.

Les roches sont des assemblages de minéraux et leurs propriétés magnétiques dépendent de la nature, de la forme et des dimensions des éléments constituants.

Aimantation induite des minéraux

Définitions. Soit un échantillon de substance homogène et isotrope, de volume V , de masse m , placé dans un champ magnétique uniforme $\vec{H}$. Considérons dans cet échantillon un élément de volume dv autour d'un point P où le champ est H_0 .

Pour la plupart des corps l'élément de volume dv acquiert sous l'influence du champ $\vec{H}_0$ un moment magnétique $d\vec{M}$ et une intensité d'aimantation $\vec{J}$ de même direction que $\vec{H}_0$ et proportionnels à $\vec{H}_0$

$$\vec{J} = \frac{d\vec{M}}{dv} = k \cdot \vec{H}_0$$

k représente la susceptibilité vraie de la substance.

$\vec{J}$ est de même sens que $\vec{H}_0$ dans les substances paramagnétiques, $k > 0$, $\vec{J}$ est de sens contraire à $\vec{H}_0$ dans les substances diamagnétiques, $k < 0$.

Pour les substances ferro ou ferrimagnétiques la susceptibilité k dépend non seulement de la valeur actuelle de H_0 mais encore de ses valeurs antérieures.

En chaque point de l'échantillon le champ $\vec{H}_0$ résulte du champ extérieur $\vec{H}$ et du champ démagnétisant $\vec{H}'$ dû à l'aimantation de l'échantillon : $\vec{H}_0 = \vec{H} + \vec{H}'$.

Dans le cas des corps dia et paramagnétiques le champ démagnétisant $\vec{H}'$ est négligeable et le moment magnétique $\vec{M}$ induit dans un échantillon par un champ extérieur $\vec{H}$ est :

$$\vec{M} = k \cdot V \cdot \vec{H}; \quad \text{d'où} \quad k = \frac{1}{V} \cdot \frac{M}{H}.$$

On appelle coefficient d'aimantation ou susceptibilité massique: $\chi = \frac{1}{m} \cdot \frac{M}{H}$. Si D est la densité de l'échantillon: $k = \chi \cdot D$

Dans le cas des corps ferromagnétiques le champ démagnétisant peut avoir une influence considérable sur l'aimantation induite des échantillons et la susceptibilité $k' = \frac{1}{V} \cdot \frac{M}{H}$, calculée comme pour une substance paramagnétique, est souvent très différente de la susceptibilité vraie, k ; k' représente la susceptibilité apparente de l'échantillon; de même $\chi' = \frac{1}{m} \cdot \frac{M}{H}$ est appelé susceptibilité massique apparente.

Susceptibilité magnétique des minéraux. G. GRENET a publié des données numériques relatives à la susceptibilité d'un grand nombre de minéraux (25).

Quelques uns sont diamagnétiques: calcite, aragonite, sel gemme, quartz, etc.; la plupart sont paramagnétiques ou faiblement ferromagnétiques. Même dans ce dernier cas la susceptibilité est à peu près indépendante du champ, dans les champs faibles, de l'ordre d'une dizaine d'oersteds.

Pour un minéral de nature donnée la susceptibilité peut varier beaucoup d'un échantillon à l'autre et je retiendrai seulement les ordres de grandeur; notons également que certains minéraux manifestent une anisotropie importante mais, en général, ils n'interviennent dans les roches que par leur susceptibilité moyenne.

Les valeurs de la susceptibilité massique, χ , sont le plus souvent de l'ordre de 10^{-5} u.e.m., même pour des oxydes de fer comme l'hématite, l'oligiste, la goethite, la limonite, tandis que certains minéraux ferromagnésiens, comme l'augite, présentent parfois une susceptibilité voisine de 10^{-3} u.e.m.. Quelques minéraux se distinguent par leur susceptibilité élevée, χ compris entre 10^{-2} et 2 u.e.m.; ce sont: la pyrrhotine, l'ilménite, la magnétite et les titanomagnétites. Malgré leur faible concentration ces minéraux jouent un rôle très important dans les propriétés magnétiques des roches et souvent l'aimantation induite d'un échantillon de roche peut être attribuée presque exclusivement à ces constituants. Dans le cas de minéraux doués d'une susceptibilité aussi élevée le champ démagnétisant, variable avec la forme des grains, a généralement une très grande influence sur l'aimantation induite d'un fragment de minéral placé dans un champ extérieur H .

Influence de la forme des grains minéraux sur leur susceptibilité apparente. Le calcul du champ démagnétisant est possible pour quelques formes simples.

a) **Cas de grains sphériques.** Une sphère de susceptibilité vraie k , de volume V , placée dans un champ uniforme H prend une aimantation d'intensité :

$$J = \frac{k}{1 + \frac{4}{3}\pi k} \cdot H$$

et présente une susceptibilité apparente :

$$k' = \frac{k}{1 + \frac{4}{3}\pi k}$$

On peut se rendre compte de l'influence du champ démagnétisant en donnant à la susceptibilité vraie, k , différentes valeurs :

k :	0,01	0,1	0,5	1	10	100
k' :	0,0096	0,070	0,16	0,19	0,23	0,24

La susceptibilité apparente, k' , est pratiquement indépendante de la susceptibilité vraie, k , lorsque k est très supérieur à 1; sa valeur limite est : 0.24.

b) **Cas de grains ellipsoïdaux très allongés.** G. GRENET (25) envisage le cas où le minéral se trouve sous forme d'ellipsoïdes de révolution très allongés.

Pour un ellipsoïde de révolution très allongé la susceptibilité apparente suivant un petit axe est :

$$k'_a = \frac{k}{1 + 2\pi k}$$

et suivant le grand axe :

$$k'_b = \frac{k}{1 + 4 \frac{b^2}{a^2} \text{Log}_e \left(\frac{2a}{b} - 1 \right)}$$

Dans le cas où $\frac{b}{a} = 10$ on aura, selon la valeur de k les valeurs ci-dessous pour la susceptibilité moyenne apparente suivant les directions principales :

k :	0,01	0,1	0,5	1	10	100
k' :	0,0096	0,073	0,22	0,33	0,80	0,90

c) **Cas de fragments minéraux en forme de pellicules minces.** Pour des pellicules minces le champ démagnétisant est négligeable dans le plan des pellicules; dans ce plan on a donc : $k' = k$. Suivant une direction perpendiculaire au plan des pellicules la susceptibilité apparente est :

$$k'_n = \frac{1}{1 + 4\pi k}$$

La valeur moyenne des susceptibilités apparentes suivant les directions principales du fragment est encore voisine des $\frac{2}{3}$ de la susceptibilité vraie du minéral lorsque celle-ci est très élevée.

Aimantation induite des roches

Le moment magnétique M acquis par un échantillon de roche de masse m , de volume V , placé dans un champ magnétique uniforme H , est égal à la somme des moments acquis par chaque fragment minéral de l'échantillon sous l'influence :

- 1° du champ H ,
- 2° du champ démagnétisant propre à chaque fragment,
- 3° du champ créé par l'aimantation du reste de l'échantillon.

Si M_1 est le moment acquis par une particule, le moment magnétique induit dans l'échantillon, M , est égal à la somme ΣM_1 étendue à toutes les particules ; la susceptibilité globale de l'échantillon est : $k = \frac{\Sigma M_1}{V} = \frac{M}{V}$; la susceptibilité massique globale est : $\chi = \frac{\Sigma M_1}{m}$

On peut distinguer deux cas :

a) Tous les minéraux de la roche sont peu magnétiques.

Le champ démagnétisant propre à chaque fragment et le champ dû à l'aimantation du reste de l'échantillon sont négligeables. Une particule de volume v_1 , de masse m_1 , de susceptibilité vraie k_1 , prend un moment $M_1 = k_1 v_1 H$, et l'on a une susceptibilité globale :

$$k = \frac{\Sigma k_1 v_1}{V} ;$$

la susceptibilité massique globale est :

$$\chi = \frac{\Sigma \chi_1 m_1}{m}$$

b) La roche contient une faible proportion de minéraux fortement magnétiques bien dispersés dans une masse peu magnétique.

L'effet sur une particule du champ créé par l'aimantation du reste de l'échantillon peut encore être négligé, en première approximation, mais le champ démagnétisant intervient dans l'aimantation de chaque particule magnétique dont le moment est très différent de $k_1 v_1 H$, k_1 étant la susceptibilité vraie du minéral, v_1 le volume d'une particule.

Si l'on considère, par exemple, un échantillon de roche de volume V où le minéral magnétique se trouve sous forme de grains sphériques bien dispersés le moment magnétique global sera :

$$M = \Sigma k'_1 v_1 H$$

En posant $\Sigma v_1 = v$, la susceptibilité globale sera :

$$k = \frac{\Sigma k'_1 v_1}{V} = k'_1 \frac{v}{V} = \frac{k_1}{1 + \frac{4}{3} \pi k_1} \cdot \frac{v}{V},$$

puisque la susceptibilité apparente d'un grain sphérique est :

$$k'_1 = \frac{k_1}{1 + \frac{4}{3} \pi k_1};$$

on en déduit la susceptibilité globale apparente :

$$\chi = \frac{k}{D} = \frac{k'_1}{D} \cdot \frac{v}{V} = \frac{k'_1}{D} \cdot \frac{m'}{m} \cdot \frac{D}{D_1}$$

m' est la masse totale des particules magnétiques dans le volume V , D étant la densité de la roche, D_1 celle du minéral magnétique.

$$\chi = k'_1 \cdot \frac{m'}{m} \cdot \frac{1}{D_1}.$$

Dans le cas où $\frac{m'}{m} = \frac{1}{100}$, $D_1 = 5$, $k_1 = 10$, $k'_1 = 0,23$

$$\chi = 460 \cdot 10^{-6} \text{ u. e. m.}$$

alors que le calcul donnerait $\chi = 20\,000 \cdot 10^{-6}$ u. e. m. en négligeant le champ démagnétisant des grains.

Avec la même concentration, la roche présenterait une susceptibilité globale plus élevée si les minéraux magnétiques, disposés au hasard dans la masse de l'échantillon, avaient une forme allongée ou aplatie (33).

R. CHEVALLIER (11) s'est placé dans le cas où l'aimantation du reste de l'échantillon a un effet appréciable sur l'aimantation d'un grain: il considère un échantillon contenant des grains ellipsoïdaux d'un minéral magnétique, tous semblables, dispersés dans une masse inactive. Le calcul modifié par G. GRENET (26), puis par J. COULOMB (14), montre que la susceptibilité globale, k , de l'échantillon est alors telle que :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{V - v}{S} \quad \text{où} \quad 3S = \frac{k_1}{1 + k_1 L} + \frac{k_1}{1 + k_1 M} + \frac{k_1}{1 + k_1 N},$$

L, M, N , étant les facteurs démagnétisants suivant les trois axes de l'ellipsoïde, v le volume de l'ensemble des grains de susceptibilité vraie k_1 , V le volume de l'échantillon.

Pratiquement la concentration des minéraux fortement magnétiques est faible dans la plupart des roches et le champ dû à l'aimantation du reste de l'échantillon a peu d'influence sur l'aimantation de chaque fragment. Par contre la forme des grains magnétiques joue un rôle très important lorsque leur susceptibilité vraie, k_1 , est supérieure à 10^{-1} u. e. m., par exemple dans les roches contenant de la magnétite.

La susceptibilité globale des roches dépend aussi des dimensions

des grains magnétiques lorsque ces grains sont de très petites dimensions : certains auteurs ont remarqué que la susceptibilité globale d'un mélange de particules magnétiques avec une matière inactive tend à diminuer lorsque les particules deviennent très petites (12), (24), (42).

Résultats des mesures de susceptibilité effectuées sur les roches.

Des déterminations de susceptibilité ont été effectuées en grand nombre, sur des roches diverses, par différents auteurs (25) (32) (52). On trouve, en particulier, dans le travail de G. GRENET, déjà cité, des données numériques concernant une grande variété de roches : les valeurs observées sont souvent très différentes d'un échantillon à l'autre pour une roche de type pétrographique donné, même lorsqu'il s'agissait d'échantillons provenant d'un gisement déterminé ; je me bornerai à signaler les ordres de grandeur.

Les roches sédimentaires sont généralement très peu magnétiques (χ de l'ordre de 10^{-5} u. e. m.) ; les roches éruptives acides, comme le granite, ont en moyenne une susceptibilité, χ , de l'ordre de 10^{-4} u. e. m., tandis que les roches éruptives basiques, diorites, gabbros, basaltes, présentent, dans l'ensemble, une susceptibilité plus élevée, χ de l'ordre de 10^{-3} u. e. m.

Les différences observées entre les propriétés magnétiques des échantillons de roches appartenant au même groupe peuvent s'expliquer par des variations dans la concentration ou la forme des grains magnétiques ; ces variations échappent au pétrographe pour qui les minéraux très magnétiques, dont la concentration est généralement très faible, ne constituent que des minéraux accessoires. Les propriétés magnétiques des roches sont en outre modifiées par l'altération dont les effets seront étudiés plus loin.

CHAPITRE III

Méthodes utilisées pour les mesures

Pour déterminer le moment magnétique $M = k.V H = \chi m.H$ induit par un champ magnétique H dans un échantillon de roche de masse m , de volume V , on peut utiliser :

La force subie par l'échantillon lorsqu'il est placé dans un champ magnétique non uniforme (méthode de Curie),

l'action exercée sur un magnétomètre par l'aimantation induite de l'échantillon,

le courant induit développé dans une bobine au moment où l'aimantation induite apparaît dans l'échantillon.

Etant donnée l'hétérogénéité des matériaux que j'avais à examiner, sols, roches plus ou moins altérés, mes mesures devaient porter sur des masses assez importantes ; d'autre part, ces mesures intéressant un grand nombre d'échantillons, la méthode utilisée devait être d'un emploi commode.

Les appareils réalisés par F. THELLIER à l'Institut de Physique du Globe de Paris (51), appareil à induction et magnétomètre astatique symétrique, m'ont permis d'effectuer rapidement des déterminations de susceptibilité et d'opérer sur des masses relativement élevées : 200 à 500 g. dans le cas de l'appareil à induction, 10 à 20 g. dans le cas du magnétomètre.

Appareil à induction

Cet appareil permet de déterminer soit des aimantations permanentes, soit des aimantations induites. Dans ce dernier cas il comporte deux séries d'enroulements. L'enroulement induit, relié à un galvanomètre balistique, est constitué par quatre grandes bobines d'Helmholtz coaxiales; les deux bobines extrêmes, disposées en opposition, sont des bobines compensatrices qui permettent d'éliminer les variations de flux dues aux perturbations du champ terrestre.

A l'intérieur de l'induit se trouve un enroulement inducteur semblable au précédent et de même axe. Le passage d'un courant I dans le circuit inducteur crée un champ magnétique uniforme entre les bobines médianes, $H = G \cdot I$, où G , calculé à partir des dimensions des bobines, est égal à 12,5 lorsque H est exprimé en oersteds et I en ampères. Le flux total produit par l'enroulement inducteur à travers l'induit est constamment nul. L'établissement du courant inducteur I crée dans l'échantillon, placé entre les bobines médianes un moment magnétique, M , ce qui provoque une variation de flux à travers l'induit et une déviation du galvanomètre proportionnelle à M .

On détermine généralement la déviation double, θ , produite par le renversement du courant inducteur I .

Pour étalonner l'appareil on substitue à l'échantillon une petite bobine dont l'axe est dirigé suivant l'axe de l'induit. Lorsqu'elle est parcourue par un courant I_0 , cette bobine présente un moment magnétique M_0 que l'on peut calculer.

En renversant le courant I_0 on lit une déviation double θ_0 et l'on a

$$M = M_0 \cdot \frac{\theta}{\theta_0} \quad \text{et} \quad \chi = \frac{M_0}{12.5 \cdot I} \cdot \frac{\theta}{\theta_0} \cdot \frac{1}{m}$$

Précision des mesures. Le circuit induit est bien compensé vis à vis des perturbations brusques du champ terrestre; il est constitué entièrement en cuivre rouge pour éviter les effets thermo-électriques: l'agitation du zéro est extrêmement faible.

Une dérive très lente du spot reste sans influence sur la précision des résultats étant donnée la rapidité des mesures.

La compensation de circuit inducteur laisse subsister une faible déviation au moment du renversement du courant; une bobine auxiliaire permet d'obtenir une compensation exacte. Pratiquement on tient compte d'un effet résiduel faible en déterminant la déviation provoquée par le renversement du courant inducteur d'abord à vide, puis en présence de l'échantillon.

Le renversement d'un moment magnétique égal à l'unité provoque sur une échelle située à 2 m. environ du galvanomètre une déviation double voisine de 40 mm. Les étalonnages successifs indiquent une légère variation de la sensibilité en fonction du temps; cependant au cours d'une journée ou même d'une semaine la sensibilité peut être considérée comme constante.

On dispose pour placer les échantillons, de forme quelconque, d'un volume d'environ 100 cm³ autour du centre de l'appareil, à l'intérieur duquel les variations du champ sont inférieures à 2 %.

Le poids moyen des échantillons que j'ai examinés avec cet appareil est de l'ordre de 200 g., le champ inducteur était produit généralement par un courant de 0,5 A, soit $H = 6,25$ oersted.

Dans ces conditions la susceptibilité a pour ordre de grandeur :

$$\chi = \frac{1}{12,5 \cdot 0,5} \cdot \frac{\theta \text{ mm}}{40} = \frac{1}{200} \cdot \frac{\theta \text{ mm}}{50.000} \text{ u.e.m.}$$

Pour une masse de 200 g. la susceptibilité, χ , est voisine de $20 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. lorsque la déviation double θ est égale à 1 mm.

La déviation double étant mesurée deux fois, une fois dans chaque sens, le spot sur la règle est suffisamment fin et stable pour que l'incertitude sur θ soit inférieure à $\frac{2}{10}$ mm. lorsque les déviations sont faibles. Pour des échantillons peu magnétiques la précision des résultats est limitée essentiellement par cette incertitude sur θ et la sensibilité de l'appareil : en opérant sur des masses de 200 g. l'incertitude sur la susceptibilité χ est inférieure à $4 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. si cette susceptibilité χ est inférieure à $100 \cdot 10^{-6}$ u.e.m.

Lorsque la déviation atteint plusieurs centimètres on peut encore l'apprécier à quelques $\frac{1}{10}$ mm. près, mais à l'incertitude sur θ vient s'ajouter une autre cause d'erreur ; l'influence du champ démagnétisant dû à l'aimantation de l'échantillon cesse d'être négligeable ; pour une sphère homogène de susceptibilité $k = 5000 \cdot 10^{-6}$ ($\chi = 2000 \cdot 10^{-6}$ si $D = 2,5$) la susceptibilité apparente est inférieure d'environ 3 % à la susceptibilité vraie. Afin de réduire l'effet du champ démagnétisant on disposera l'échantillon de manière que sa plus grande dimension soit dirigée suivant l'axe de l'appareil.

J'ai envisagé ci-dessus le cas où le poids de l'échantillon est voisin de 200 g. Avec des substances peu magnétiques la précision des mesures diminue quand le poids des échantillons décroît : pour une masse de 20 g. d'une substance de susceptibilité, χ , voisine de $100 \cdot 10^{-6}$, θ sera voisin de $\frac{5}{10}$ mm. et l'incertitude sur θ entraîne sur la susceptibilité une incertitude de l'ordre de $40 \cdot 10^{-6}$ u.e.m.

En résumé cet appareil à induction permet de déterminer la susceptibilité, χ , d'un échantillon avec une précision de l'ordre de 3 à 4 % lorsque la susceptibilité est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} u.e.m. à condition d'opérer sur des masses de l'ordre de 200 g.

Les mesures sont commodées et rapides, la méthode convient bien pour l'examen en série des roches et des sols.

Lorsque les déviations sont faibles on peut améliorer la précision des mesures en utilisant des champs magnétisants plus intenses, la susceptibilité étant indépendante du champ, mais il est préférable si l'on recherche une plus grande précision d'utiliser la méthode magnétométrie.

Magnétomètre astatique symétrique

L'équipage mobile est constitué par trois petits barreaux aimantés horizontaux fixés sur un tube de verre suspendu à un fil sans torsion : les deux barreaux B et B' de moment magnétique M , placés

symétriquement par rapport au barreau central A de moment magnétique $2M$, ont pour effet de rendre l'ensemble astatique et d'éliminer la partie principale des perturbations magnétiques à champ non uniforme.

Le système mobile est disposé à l'intérieur d'un tube protecteur en verre, fermé à ses deux extrémités.

Le champ directeur, réglable, est produit par deux bobines d'Helmholtz situées de part et d'autre de l'aimant central.

Le champ magnétisant est fourni par une bobine d'axe vertical dont l'action sur le magnétomètre est compensée par une deuxième bobine semblable disposée symétriquement par rapport au système mobile.

Pour déterminer les susceptibilités l'échantillon, cylindrique, est glissé dans la bobine inductrice de manière que l'une de ses extrémités vienne se placer devant l'aimant central. Sous l'action du champ inducteur H_1 , créé par le passage d'un courant I_1 dans la bobine, l'échantillon prend une aimantation longitudinale J_1 . A cette aimantation se superposent l'aimantation permanente de l'échantillon et l'aimantation induite par le champ terrestre dont les composantes transversales peuvent être éliminées par la rotation et la translation de l'échantillon.

L'extrémité supérieure de l'échantillon étant amenée en face de l'aimant central, on fait successivement quatre lectures de la déviation en faisant tourner chaque fois l'échantillon de 90° autour de son axe, puis en recommence en plaçant l'extrémité inférieure de l'échantillon devant l'aimant A. L'aimantation étant supposée uniforme, la déviation double moyenne θ provoquée par l'échantillon se ramène à celle qui serait produite par des charges magnétiques $+Q$ et $-Q$ réparties uniformément sur les extrémités avec une densité égale à l'aimantation longitudinale globale. Celle-ci résulte de trois termes: J aimantation permanente, J' aimantation induite par le champ terrestre, J_1 aimantation induite par le champ H_1 et l'on a :

$$Q = s(J + J' + J_1)$$

où s est la section du cylindre.

Pour étalonner l'appareil on substitue à l'échantillon une bobine de mêmes dimensions; lorsqu'elle est parcourue par un courant I_0 cette bobine est équivalente à un cylindre aimanté porteur des charges $+Q_0$ et $-Q_0$ à ses extrémités, charges que l'on peut calculer à partir des caractéristiques de la bobine et de l'intensité I_0 .

Le renversement du courant I_0 provoque une déviation double θ_0 et l'on a :

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{Q}{Q_0}.$$

Lorsque l'intensité du courant inducteur est nulle la déviation double, due à $J + J'$, est θ_1 , lorsque l'intensité du courant inducteur est I_1 la déviation double, due à $J + J' + J_1$, est θ_2 , de sorte que :

$$\frac{s \cdot J_1}{Q_0} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_0}.$$

L'aimantation étant uniforme, le moment magnétique M induit dans l'échantillon de section s , de longueur L , de masse m , par un champ H_1 , est égal à :

$$M = J_1 \cdot s \cdot L = Q_0 \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_0} \cdot L$$

d'où la susceptibilité massique :

$$\chi = Q_0 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_0} \cdot \frac{L}{m \cdot H_1}.$$

Précision des mesures. Les perturbations du champ terrestre ont peu d'influence sur le système mobile qui est également bien protégé contre l'instabilité thermique. Avec un courant directeur de 5 milliampères l'agitation du spot autour de sa position moyenne ne dépasse pas 0,2 mm. En procédant aux différentes opérations d'une mesure dans un ordre convenable on peut d'autre part corriger l'effet de la dérive très lente du zéro. L'agitation du spot et la dérive du zéro diminuent encore lorsque l'intensité du courant directeur augmente.

Les mesures d'étalonnage sont très rapides et peuvent être répétées fréquemment : leur comparaison montre que la sensibilité ne subit que des variations très faibles.

Un échantillon cylindrique de sol, de mêmes dimensions que la bobine d'étalonnage, a un poids moyen de 15 g. ; quand on utilise un courant directeur de 5 milliampères, créant un champ d'environ 0,02 oersted, et un champ inducteur de 10 oersteds la susceptibilité, χ , a pour ordre de grandeur :

$$\chi = 2,25 (\theta_2 - \theta_1) \cdot 10^{-6} \text{ u. e. m.}$$

les déviations doubles θ_2 et θ_1 étant évaluées en mm. sur une règle placée à 1 m. du magnétomètre ; l'incertitude sur $\theta_2 - \theta_1$ est inférieure à 0,4 mm.

On n'a pas intérêt à utiliser des courants directeurs inférieurs à 5 milliampères pour augmenter la sensibilité de l'appareil parce que la précision des mesures est alors réduite par l'instabilité du zéro.

Lorsque les échantillons n'ont pas les dimensions de la bobine d'étalonnage, section et longueur, il faut faire une correction de surface et une correction de longueur. Pratiquement ces corrections sont toujours faibles, souvent négligeables. La plupart des échantillons que j'ai étudiés au magnétomètre étaient constitués par des poudres, roches broyées, sols, tassées dans des tubes de verre dont les dimensions intérieures sont voisines de celles de la bobine d'étalonnage.

La rotation de l'échantillon au cours des mesures a pour effet d'éliminer les erreurs dues au défaut de centrage de l'échantillon ; elle apporte également une correction au manque d'homogénéité de l'échantillon.

L'influence du champ démagnétisant dû à l'aimantation de l'échantillon est presque toujours négligeable : ce sont des échantillons cylindriques dont la longueur est voisine de 70 mm. et le diamètre voisin de 16 mm, leur susceptibilité, χ , était toujours inférieure à 10^{-2} u. e. m. En assimilant ces échantillons à des ellipsoïdes on peut montrer que l'erreur relative que l'on commet en négligeant le champ démagnétisant est inférieure à 1 % pour les susceptibilités les plus élevées rencontrées au cours de ces mesures.

En définitive ce magnétomètre permet de déterminer avec une précision de l'ordre de 2 % les susceptibilités comprises entre 100 et $10.000 \cdot 10^{-6}$ u. e. m. et la précision atteint encore 5 % pour les susceptibilités de l'ordre de $20 \cdot 10^{-6}$ u. e. m.

Viscosité magnétique

Au cours des mesures de susceptibilité par la méthode magnétométrique j'ai constaté que les sols présentent souvent une viscosité magnétique importante, phénomène qui a déjà été étudié par E. THELLIER sur des terres cuites et sur des roches (51): lorsque l'on établit un champ inducteur H , on constate que la déviation du spot augmente progressivement en fonction du temps.

Avec une argile, extraite d'un sol, placée dans un champ de 6,7 oersted, le courant directeur étant de 30 milliampères, j'ai fait successivement les lectures suivantes un temps t après l'établissement du champ inducteur :

$t = 15 \text{ s.}$	$t = 1 \text{ mn.}$	$t = 5 \text{ mn.}$
18,40 cm.	18,20 cm.	18,00 cm.

Après la 5^e minute le déplacement du spot devient très faible. Ce phénomène est réversible, il se reproduit quand on supprime le courant inducteur; lorsqu'on inverse le courant inducteur on observe des déplacements du spot qui sont sensiblement doubles des précédents pour des temps correspondants :

$t = 15 \text{ s.}$	$t = 1 \text{ mn.}$	$t = 5 \text{ mn.}$
30,90	30,82	31,22

Il est difficile d'apprécier correctement la position du spot pendant les secondes qui suivent immédiatement l'établissement où le renversement du courant inducteur.

Dans toutes les mesures que j'ai effectuées au magnétomètre j'ai noté la position du spot 1 minute et 5 minutes après l'établissement, le renversement ou la suppression du courant inducteur, et les opérations, rotation et translation de l'échantillon, commençaient seulement après ce délai.

Afin d'étudier, au mieux, le comportement des échantillons j'ai procédé fréquemment à une série de déterminations de la déviation double θ de la manière suivante :

- 1° le courant inducteur étant nul la déviation double est θ_1 .
 - 2° le courant inducteur crée un champ H_1 de même sens que la composante verticale Z du champ terrestre, la déviation double est θ_2 .
 - 3° le courant inducteur est inversé, le champ inducteur H_1 est de sens contraire à Z , la déviation double est θ_3 .
 - 4° le courant inducteur est à nouveau inversé, H_1 est de même sens que Z , la déviation double est θ_4 , peu différente de θ_2 .
 - 5° le courant inducteur est supprimé, la déviation double est θ_5 .
- La susceptibilité χ de l'échantillon, correspondant à l'aimantation induite créée par un champ H_1 , agissant pendant une durée moyenne de 8 minutes, peut être calculée à partir de la différence $\theta_2 - \theta_1$, ou à partir de la valeur moyenne :

$\theta = \frac{\theta_2 + \theta_4}{2} + \theta_3$; la différence $\theta_5 - \theta_1$ correspond au magnétisme rémanent.

La série d'opérations ci-dessus permet de constater que le traînage est réversible; on peut le caractériser par le rapport $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ où $\Delta\theta$ représente le déplacement du spot entre l'instant $t = 1$ minute et l'instant $t = 5$ minutes après le renversement du courant inducteur. Une dérive éventuelle du zéro se trouve corrigée en prenant la moyenne des valeurs de $\Delta\theta$ observées au cours des opérations 3 et 4.

Pour l'argile précédente $\Delta\theta = 0,40$ cm. $\theta = 13,20$ cm.

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{0,40}{13,20} \simeq \frac{30}{1000}$$

On voit sur cet exemple que le traînage peut jouer un rôle important dans la détermination de la susceptibilité des roches et des sols; pour obtenir des valeurs comparables les échantillons doivent être soumis à l'action du champ magnétisant pendant des temps égaux; sur un échantillon donné la susceptibilité mesurée au magnétomètre, en moyenne 8 minutes après l'établissement du champ inducteur, sera systématiquement supérieure à la valeur trouvée par la méthode d'induction.

Variation de la susceptibilité en fonction du champ

La méthode magnétométrique se prête bien au tracé de la courbe de première aimantation et du cycle d'hystérésis. Même dans le cas des échantillons les plus magnétiques parmi ceux que j'ai étudiés la courbe de première aimantation entre 0 et 2700 est très sensiblement une droite: dans les champs faibles la susceptibilité de ces matériaux est pratiquement constante. Le cycle d'hystérésis est très aplati: le caractère ferromagnétique se manifeste seulement par une aimantation rémanente très faible.

Des deux méthodes, méthode d'induction et méthode magnétométrique, j'ai utilisé surtout la première: elle est plus commode et plus rapide puisqu'elle permet d'opérer sur des échantillons de forme quelconque et que chaque détermination se réduit à un petit nombre de lectures; elle a en outre l'avantage, dans les mesures de susceptibilité globale, d'être moins sensible aux défauts d'homogénéité des matériaux et de porter sur des masses plus importantes. Les valeurs qu'elle fournit pour la susceptibilité des roches et des sols présentent, en général, une précision suffisante.

CHAPITRE IV

Susceptibilité des différentes couches du sol

Prélèvement et préparation des échantillons

Pour obtenir des échantillons correspondant aux différentes couches de profils variés j'ai utilisé des tranchées assez profondes pour faire apparaître la roche-mère: travaux de terrassement, carrières etc...

En général, certains caractères comme la couleur, la structure, mettent en évidence des couches distinctes: après avoir mesuré l'épaisseur des différentes couches et noté leur position par rapport à la surface, j'ai prélevé des échantillons d'environ 1 Kg. représentant chacun la composition moyenne d'une couche. Parfois, pour des couches épaisses d'apparence homogène, les prélèvements sont espacés régulièrement.

Chaque fois que l'occasion s'est présentée j'ai prélevé également des échantillons de la roche-mère correspondant à des stades d'altération différents.

Sur des pentes accusées, où l'érosion est active, l'épaisseur de la couche meuble qui recouvre la roche-mère peut être seulement de quelques centimètres: dans ce cas le sol est représenté par un seul échantillon.

Après séchage à l'air les échantillons de sols sont tamisés: pour me conformer aux conventions internationales relatives à l'analyse mécanique des sols (19), je sépare la «terre fine», fraction qui passe au travers d'un tamis à trous ronds de 2 mm de diamètre, des «pierres et graviers».

Chaque fraction ayant été pesée, je prélève un échantillon de 200 g. de terre fine; les «pierres» et les «graviers», en proportions variables mais généralement peu importantes dans les couches meubles, constitueront un deuxième échantillon relatif au même horizon.

La susceptibilité magnétique des différents échantillons est ensuite mesurée avec l'appareil à induction. Les propriétés magnétiques des «pierres et graviers» seront étudiées dans un autre chapitre; le plus souvent elles sont peu marquées.

Les premières mesures concernaient des sols de la Bretagne Centrale où les terrains présentent déjà une grande diversité par la nature de la roche-mère, la topographie, la végétation, etc... Par la suite ces recherches se sont étendues à d'autres régions avec l'aide de M. HENIN, Directeur du Laboratoire des Sols au Centre National de Recherches Agronomiques, qui m'a procuré un grand nombre d'échantillons prélevés en France ou dans les territoires d'Outre-mer.

Comparaison de trois profils voisins

Pour voir dans quelle mesure les résultats sont reproductibles sur des sols voisins développés dans des conditions identiques, (roche-mère, situation topographique, végétation, climat) je comparerai d'abord trois profils, espacés de 200 m., prélevés en terre labourée sur un plateau schisteux.

Dans les trois cas on rencontre successivement les mêmes couches : en surface une terre brune humifère d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, entre 20 et 50 cm. une terre jaune sablo-argileuse, entre 50 et 80 cm. une terre grise avec de nombreux débris de schistes, au dessous de 80 cm. un schiste très altéré. Le tableau ci-dessous représente pour les trois profils les susceptibilités des différentes couches, évaluées en 10^{-6} u.e.m. comme dans les tableaux suivants ; pour les couches meubles, la susceptibilité indiquée est celle de la «terre fine» ($d < 2\text{mm}$).

Profils n° 1, 2, et 3

Sol cultivé sur plateau schisteux à Kerfourn (Morbihan)

Profondeur en cm	0 — 20	20 — 50	50 — 80	80 — 110	110—140	140—160
Profil n° 1 $\chi =$	612	33	27	17	14	
Profil n° 2 $\chi =$	498	36	12	14	11	12
Profil n° 3 $\chi =$	934	41	16	14	8	

La susceptibilité de la couche superficielle est variable d'un profil à l'autre mais importante dans les trois cas ; la susceptibilité diminue brusquement lorsqu'on s'écarte de l'horizon supérieur et tend vers la valeur propre à la roche-mère qui est ici un schiste peu magnétique.

Profils correspondant à des roches-mères différentes

Dans la Bretagne Centrale les sols développés sur la même roche-mère n'occupent en général que des surfaces restreintes. Les roches-mères les plus fréquentes sont des schistes, des granites, des dépôts de formation plus ou moins ancienne. Il arrive que ces dépôts contiennent des sables magnétiques : ce cas sera traité à part.

Sols formés sur dépôts de sable et galets roulés.

Sols granitiques :

Nouvelle route de Le Sourn à Linguenec (Morbihan)

Profil n° 4 : Lande inculte, végétation : genêts, ajoncs, fougères.

Profondeur en cm	0 — 25	25 — 50	50 — 70	70 — 90	> 90
χ	87	19	17	14	13
couches successives	terre brun foncé	terre sablonneuse marron		granite très altéré	granite altéré

Profil n° 5 : Lande inculte ; végétation : genêts, ajoncs, fougères.

Profondeur en cm	0—25	25—50	50—70	70—90	90—110	110—200	> 200
χ	88	39	24	19	16	13	12
couches successives	terre brun foncé	terre sablonneuse marron, puis jaune			sable		

Profil n° 6 : Carrière de Canteldeuc, La Trinité-Porhoet (Morbihan) terre inculte, végétation : genêts.

Profondeur en cm	0—30	30—50	50—80	80—120	120—160	> 160
χ	59	38	19	17	7	7
couches successives	terre brune	terre sablonneuse, galets roulés		sable et gravier	sable	

Profil n° 7 : Carrière de Moréac (Morbihan) terre cultivée

Profondeur	0 — 25	25 — 80	> 80
χ	126	26	4
couches	terre brune	terre sablo-argileuse	sable et galets roulés

L'allure de la variation de la susceptibilité en fonction de la profondeur est la même pour tous ces profils quelle que soit la nature de la roche-mère.

Profils relevés dans des régions différentes

Lorsque les échantillons sont prélevés dans des régions différentes on fait varier non seulement la nature de la roche-mère mais encore le climat qui constitue un facteur important dans l'évolution des sols.

Profil n° 8 : Etoile de Choisy, Versailles. Sol brun lessivé sur limon recouvrant des marnes imperméables, sous forêt, humide.

Profondeur	0—20	20—40	40—57	57—75	75—95
χ	19	14	12	10	8

Profil n° 9 : Cormeilles en Parisis. Sol argileux sur sédiments, cultivé

Profondeur	0 — 20	50 — 60	90 — 100
χ	72	84	15

Profil n° 10 : Antoniména (Madagascar) Profil fourni par M. HENIN. Sol latéritique recouvrant une cuirasse ferrugineuse, sous prairies.

Profondeur	0—80	80—280	280—340	> 340
χ	200	82	81	1 430

La cuirasse ferrugineuse située entre 280 et 340 cm recouvre une roche basaltique altérée.

Profil n° 11 : Accidutanto (Madagascar), Profil fourni par le Muséum

couches	horizon humifère	terre jaune	carapace ferrugineuse	argile	roche altérée
χ	42	22	28	10	12

Comme pour les sols bretons la susceptibilité de la couche superficielle est nettement supérieure à celle des couches sous-jacentes, quelle que soit la région où les échantillons ont été prélevés.

Cas des sols de faible épaisseur

Dans les profils précédents, relevés sur des plateaux, des plaines ou des pentes peu accentuées, la formation du sol s'est poursuivie pendant une longue période sans perturbation et l'on observe plusieurs couches meubles différenciées au-dessus de la roche-mère.

Sur les pentes accusées il arrive souvent qu'on ne distingue qu'une couche de 20 à 30 cm. d'épaisseur, parfois moins, recouvrant la roche-mère plus ou moins altérée; ce cas n'est pas rare sur les massifs schisteux ou granitiques de la Bretagne Centrale.

Sur des roches-mères peu magnétiques la susceptibilité de ces sols peu développés se présente généralement de la manière suivante :

Profil n° 12 : Butte granitique : Malguénac (Morbihan)

Lande inculte : végétation : ajones, fougères.

Profondeur	0—25	25—45	45—100	100—150	> 150
χ	81	3	3	3	3
couches	terre brune	granite très altéré	granite de moins en moins altéré		

Des échantillons correspondant à ce type de sol ont été prélevés dans différentes régions; j'ai déterminé la susceptibilité de la couche superficielle et celle de la roche-mère sous-jacente, le plus souvent altérée.

Sols bretons :

lieu	Pluméliau Morbihan	Rohan Morbihan	Mûr Côtes-du-Nord	St Gilles Côtes du-Nord	Le Sourn Morbihan
sol	1800	207	201	51	113
roche	12 schiste	12 schiste	25 schiste ardoisier	14 quartzite	12 granite

Sols pyrénéens :

lieu	Pic de Cabaleiros Htes Pyrénées	Col de Riou Htes Pyrénées	Col du Lisey Htes Pyrénées	Mamelen vert Htes Pyrénées
sol	70	91	17	118
roche	26 schiste gréseux	14 schiste	10 schiste	9 schiste

Sols rouges méditerranéens(Vaucluse) — Echantillons fournis par M. HENIN.

	sol rouge sur calcaire	sol rouge sur terrasse
sol	127	63
roche	0	10

Sols schisteux de Saône-et-Loire. Echantillons fournis par M. HENIN.

sol	74
roche	14

La susceptibilité de ces sols de faible épaisseur est nettement plus élevée que celle des roches peu magnétiques qu'ils recouvrent.

Sols développés sur des alluvions magnétiques anciennes

On rencontre quelquefois des sols formés sur des alluvions contenant une proportion relativement élevée de sables magnétiques; dans ce cas les différents horizons peuvent présenter des susceptibilités importantes, mais la susceptibilité maxima appartient encore à la couche superficielle humifère comme le montrent les exemples ci-après.

Profil n° 13 : Sol formé sur un dépôt de sables magnétiques recouvrant du schiste à Bolumet Pontivy

Profondeur	0—35	35—50	50—80	80—110	110—140	> 140
χ	501	181	88	60	25	29
couches	terre brune	galets, sables et argile			schiste très altéré	

Profil n° 14 : Sol formé sur un dépôt épais de sables magnétiques, Nouveau terrain de sports, Pontivy.

Profondeur	0—30	30—55	55—85	85—151	115—145	145—175	> 175
χ	500	20	84	81	166	182	109
couches	terre brune	terre argileuse	argile et sable	argile rouge et sable	argile très rouge et sable	argile rouge et galets	argile rouge et sable

Profil n° 15 : Sol formé sur des sables magnétiques La Minière (Seine-et-Oise)
Echantillons fournis par M. HENIN

Profondeur	0—20	20—35	35—50	50—65
χ	190	96	153	116

Dans ce dernier cas les susceptibilités indiquées correspondent à la terre brute, avant tamisage.

Sols enterrés

Il arrive parfois qu'un sol déjà formé soit recouvert par des apports d'origine assez récente pour que la couche superficielle soit encore peu humifère. La falaise située à l'extrémité Est de la plage de Sainte-Marine (Finistère) en fournit un exemple: le sol initial, formé aux dépens du granite, a été recouvert par une couche de sable de dune.

Profil n° 16 : Sol granitique enterré sous du sable de dune

Profondeur	0—30	30—70	70 cm
χ	16	346	4
couches	sable	sol brun	granite altéré

La susceptibilité maxima n'est plus localisée dans la couche superficielle mais dans l'horizon humifère sous jacent.

Il est permis de penser que la formation d'un nouvel horizon humifère, consécutive au développement de la végétation, sera accompagnée d'une augmentation de la susceptibilité dans la couche superficielle: encore très faible, $\chi = 16$, la susceptibilité de cette couche de sable sur laquelle poussent quelques herbes est néanmoins supérieure à celle du sable prélevé sur la plage voisine, $\chi = 4$.

Cette hypothèse semble confirmée par les observations relatives au profil suivant, relevé sur le littoral de la pointe d'Arcachon à la plage du Pyla: un sol enterré a été recouvert par du sable dunaire sur lequel s'est développé un deuxième sol.

Profil n° 17: Littoral de la pointe d'Arcachon, Pyla-sur-mer

couches	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
χ	48	6	2	16	111	67	80	18

Les couches *a*, *b*, *c*, *d* correspondent aux horizons A_0 , A_1 , A_2 , B_1 du sol supérieur, tandis que les couches *e*, *f*, *g*, *h* correspondent à un sol enterré: (*e*) sable brun humifère avec concrétions aliotiques, (*f*) zone humifère qui pourrait correspondre à l'horizon *A* du sol enterré, (*g*) zone ferro-humifère, (*h*) sable dunaire ou horizon lessivé.

Des observations faites sur place ont conduit M. HENIN, qui m'a fourni ce profil, à supposer que les couches *e*, *f*, *g*, *h* proviennent d'un sol effondré, recouvert ensuite par du sable dunaire; la formation ultérieure d'un deuxième sol a provoqué une accumulation des éléments entraînés dans les couches humifères *e*, *f*, *g*.

Au point de vue magnétique la variation de la susceptibilité en fonction de la profondeur fait apparaître deux maxima correspondant aux zones humifères des deux sols superposés.

Susceptibilité et teneur en fer des différentes couches

Si la susceptibilité du sol est liée à la présence de combinaisons ferrugineuses magnétiques, il n'y a pas, en général, de relation étroite entre la susceptibilité des différentes couches et leur teneur en fer.

Sous les climats tempérés la migration du fer dans le sol se produit généralement vers les horizons inférieurs, néanmoins la couche la plus magnétique est la couche humifère superficielle.

Il ya parfois une accumulation considérable de fer dans certaines couches (alios des Landes, cuirasse ferrugineuse des sols latéritiques); malgré leur richesse en fer ces horizons ne présentent, dans la plupart des cas, qu'une susceptibilité peu élevée.

En ce qui concerne le sol humide de l'Etoile de Choisy, profil

n° 8, la concentration en oxyde de fer libre Fe_2O_3 est appréciable pour tous les horizons, 0,88 % entre 0 et 20 cm, 1,25 % entre 75 et 95 cm. (18 p. 64 bis), tandis que les susceptibilités sont respectivement 19 et 8 pour ces deux couches.

Cette indépendance entre la susceptibilité et la concentration en fer s'explique par les propriétés magnétiques des différentes combinaisons du fer dont certaines, comme la magnétite, les titanomagnétites, l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3 \gamma$, sont très magnétiques, tandis que d'autres, comme le sesquioxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3 \alpha$, le sont très peu. Après migration dans le sol le fer précipite sous une forme peu magnétique et les couches d'accumulation n'ont qu'une faible susceptibilité.

Lorsque la migration a été importante il peut arriver que les couches situées au-dessus du niveau d'accumulation soient très appauvries en fer. La susceptibilité est alors très faible dans tous les horizons, même dans la couche superficielle; ce cas correspond au profil suivant relevé dans les Landes.

Profil n° 18: Landes (profil fourni par M. HENIN)

Profondeur	0 — 5	5 — 18	18 — 26	26 — 29	29 — 35	35 — 37	37 — 53	53 — 63	63 — 80
%	5	4	3	3	3	5	6	6	3
couches	A ₀ sable et ra- cines	A sable grisâtre		B ₁ sable noirâtre		B ₂ sable noir	B ₃ alios	C sable jaune	

La susceptibilité est ici très faible: la sensibilité de l'appareil à induction permet d'affirmer qu'elle est inférieure à 10 pour toutes les couches.

Conclusion

Ces mesures, effectuées sur des sols variés, montrent que la susceptibilité du sol, variable d'un sol à l'autre, est, en général, nettement supérieure à celle de la roche-mère sous-jacente.

Lorsqu'un profil présente plusieurs horizons différenciés, la susceptibilité est maximum dans l'horizon humifère supérieur où elle atteint parfois des valeurs considérables; elle subit souvent une diminution brusque quand on passe de cet horizon aux couches inférieures. L'allure de la variation de la susceptibilité en fonction de la profondeur reste la même pour des sols développés sur des roches-mères différentes, peu magnétiques, ou sous des climats différents.

Sur les pentes, où le profil est réduit à une couche meuble de faible épaisseur recouvrant la roche-mère, la susceptibilité de cette couche humifère est beaucoup plus grande que celle de la roche.

Si le sol s'est formé sur des sables magnétiques la susceptibilité est encore maximum dans la couche superficielle mais la variation

da la susceptibilité en fonction de la profondeur devient plus complexe.

Enfin la répartition des susceptibilités en fonction de la profondeur se trouve modifiée dans le cas des sols enterrés: les susceptibilités les plus élevées appartiennent aux horizons humifères.

Parmi les nombreuses combinaisons du fer présentes dans le sol quelques unes seulement sont fortement magnétiques de sorte que la susceptibilité et la concentration en fer total des différentes couches sont assez indépendantes.

CHAPITRE V

Susceptibilité de l'horizon humifère supérieur

Il résulte de l'étude précédente que les propriétés magnétiques du sol se manifestent surtout dans la couche superficielle humifère dont l'épaisseur est généralement de l'ordre de 20 à 30 cm.

Susceptibilité de la couche superficielle humifère dans la Bretagne Centrale

Au moyen de prélèvements régulièrement espacés j'ai cherché à dresser une carte des susceptibilités de la couche superficielle dans une zone s'étendant sur 2.000 Km² environ autour de Pontivy (36). Des échantillons, représentant la composition moyenne du sol entre 0 et 20 cm. ont été recueillis, tous les kilomètres, suivant un certain nombre d'itinéraires. Les résultats sont très dispersés comme le montrent les valeurs suivantes évaluées en 10⁻⁶ u.e.m., observées sur les échantillons successifs le long de deux itinéraires orientés approximativement Nord-Sud et Est-Ouest:

Itinéraire N.-S.: St Gilles-Mur-Pontivy-Pluméliau-Loecliné.

139, 51, 109, 474, 201, 343, 181, 212, 30, 467, 479, 227, 79, 65,
111, 450, 90, 448, 297, 156, 134, 98, 446, 79, 157, 410, 350, 21,
487, 226, 601, 582, 1.685, 723, 460, 798, 722, 210, 58, 64.

Itinéraire E.-W.: Le Teil-Pontivy-Guémené.

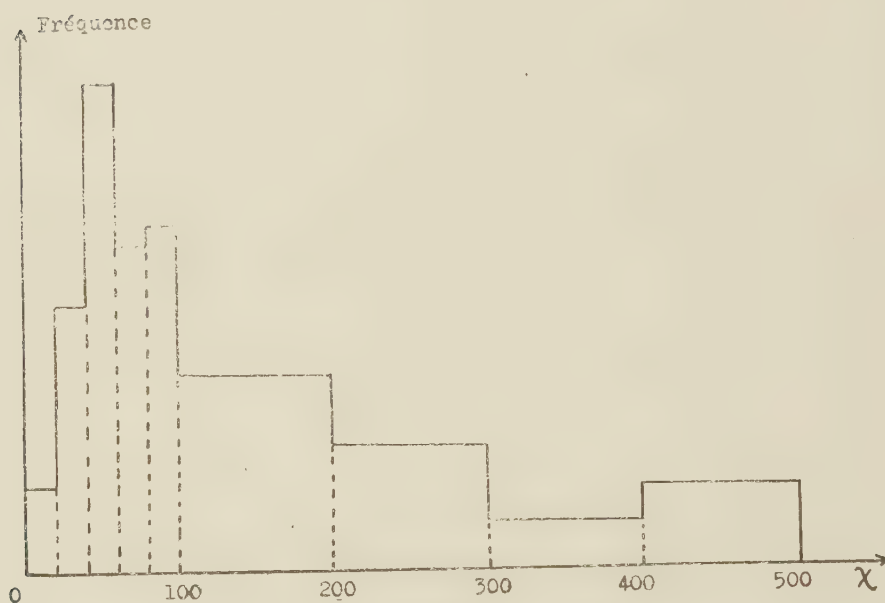
227, 228, 698, 698, 980, 863, 469, 77, 226, 476, 175, 75, 48,
32, 85, 245.

Pour l'ensemble de la région la susceptibilité de la couche superficielle, comprise entre 16 et 1.800, est toujours appréciable, souvent importante: la moyenne arithmétique des susceptibilités observées sur 204 échantillons prélevés dans cette région est voisine de 250. La répartition de ces susceptibilités, indiquée dans les tableaux et le graphique montre que la valeur médiane se situe aux environs de 160.

χ	0 — 100	100 — 200	200 — 300	300 — 400	400 — 500	500 — 1.000	> 1.000
nombre d'échantillons	74	48	31	11	20	17	3

Pour les 74 échantillons dont la susceptibilité est inférieure à 100 la distribution est la suivante:

χ	16 — 20	20 — 40	40 — 60	60 — 80	80 — 100
nombre d'échantillons	4	13	24	16	17



Graphique 1

En définitive sur ces 204 échantillons, 130 ont une susceptibilité supérieure à 100 et 187 une susceptibilité supérieure à 40, alors que les roches sous-jacentes, généralement des schistes ou des granites, ont une susceptibilité inférieure à 20; seuls quelques filons de diabase et quelques dépôts de sables magnétiques très localisés présentent une susceptibilité comparable à celle de la plupart des sols.

Les valeurs les plus élevées concernent des sols schisteux, cependant lorsqu'on reporte les résultats sur une carte géologique on ne voit pas de relation étroite entre la susceptibilité de la couche superficielle et la nature minéralogique des roches du sous-sol.

Variée au point de vue géologique, cette région l'est également par la végétation et le relief. Les parcelles cultivées voisinent avec des landes et des bois. Le comportement de l'horizon humifère est analogue pour les terres cultivées et les terres incultes, sous les bois et sous les ajoncs. On ne voit pas non plus, dans ce réseau de prélèvements à larges mailles, de différence systématique entre les échantillons recueillis sur des buttes ou sur des pentes et ceux qui

sont recueillis sur des plateaux. Les observations faites sur le terrain permettent cependant de constater que les susceptibilités les plus faibles, voisines de 20, correspondent toutes à des sols très humides, tourbeux ou marécageux.

Influence des conditions d'humidité sur la susceptibilité des sols en place

Parmi les profils examinés pour étudier la variation de la susceptibilité avec la profondeur, le profil n° 8, Etoile de Choisy, correspond à un sol très humide: la susceptibilité est très faible pour tous les horizons, y compris l'horizon supérieur humifère. On vient de voir, d'autre part, sur des prélèvements régulièrement espacés dans la Bretagne Centrale, que les susceptibilités les plus faibles appartiennent à des sols très humides, c'est à dire des sols dont l'humidité moyenne au cours de l'année est toujours élevée.

Afin de préciser l'influence de l'humidité sur la susceptibilité des sols en place, des séries d'échantillons ont été prélevées en des points voisins, en tenant compte de la végétation et de la situation topographique (37). Certaines plantes, comme les joncs, sont caractéristiques d'un sol très humide et l'observation sur le terrain permet généralement d'apprécier grossièrement l'humidité relative des différents prélèvements.

Les sols très humides ne se prêtent pas à la culture; parfois toute la zone intéressée par une série de prélèvements est inculte, souvent la même série comporte des sols cultivés voisinant avec des sols incultes plus humides; dans certains cas, où l'humidité n'est pas excessive, tous les prélèvements d'une série correspondent à des sols cultivés.

Les échantillons sont prélevés dans la couche superficielle, entre 0 et 20 cm, en s'inspirant des observations recueillies sur place; en terrain légèrement vallonné ils peuvent correspondre à des lignes de pente. L'espacement des points de prélèvement est très variable: il est en général compris entre 10 m. et 100 m.

Résultats:

Chateau-Gaillard-Pontivy

Terrain en pente douce

Situation	Bas-fond très humide sous prairie	Bas de pente humide sous prairie	Mi-pente cultivé	Haut de pente cultivé
χ	12	26	116	112

Talcoët-Pontivy

Léger vallonnement dans un champ cultivé en totalité.

Situation	Haut de pente	Bas de pente humide	Bas de pente le plus humide	Haut de pente
χ	106	42	32	90

Kerfourn-Morbihan

Terrain en pente douce

Situation	Bas-fond très humide, marécageux	Bas de pente, cultivé	Dans la pente, cultivé	Dans la pente, cultivé	Haut de pente cultivé
χ	24	576	856	866	776

Sainte-Brigitte (Morbihan)

Terrain en pente douce de part et d'autre d'une tourbière

Situation	Haut de pente cultivé	Dans la pente, cultivé	Bas de pente humide, prairie	Bas-fond très humide, prairie	Bas-fond tourbière	Bas-fond marécageux	Dans la pente cultivé	Haut de pente cultivé
χ	454	280	20	17	8	5	256	241

La Grenouillère en Noyal-Pontivy

La route de Rohan à Pontivy, orientée Est-Ouest, traverse ici une zone marécageuse; une série d'échantillons a été prélevée de chaque côté de la route.

Côté sud :

Situation	Haut de pente cultivé	Dans la pente, cultivé	Bas-fond marécageux	Bas-fond pré humide	Bas-fond marécageux	Bas de pente pré	Dans la pente, lande
χ	694	986	10	10	7	34	750

Côté Nord

Situation	Haut de pente, cultivé	Bas de pente, cultivé	Bas-fond marécageux	Bas-fond marais	Bas de pente, pré	Haut de pente, cultivé
χ	1.416	1.025	16	8	38	1.034

Gléné (Saône-et-Loire)

Situation	Bas de pente, humide	Dans la pente	Dans la pente	Dans la pente	Haut de pente
χ	24	160	590	240	268

Cette série d'échantillons m'a été procurée par M. HENIN, ainsi que la suivante, prélevée à Saint-Aubin sur Loire :

Prélèvements de Saint-Aubin sur Loire (Fig. 1)

Sol schisteux pollué par d'anciennes alluvions sableuses.

1, Bas de pente. 2, Mi-pente. 3, Sommet alluvions. 4, Sommet sec. 5, Sur la pente. 6, Bas de pente, genêts. 7, Pente sèche. 8, Sur une croupe. 9, Sommet humide, ronces. 10, Bas de pente humide. 11, Mi-pente. 12, Sous les genêts 1^{re} côte. 13, Bas-fond, joncs. 15, Buisson au-dessus de la mare. 16, Dans la mare.

Les zones humides et très humides sont indiquées par des traits interrompus; les courbes de niveau sont représentées en pointillé.

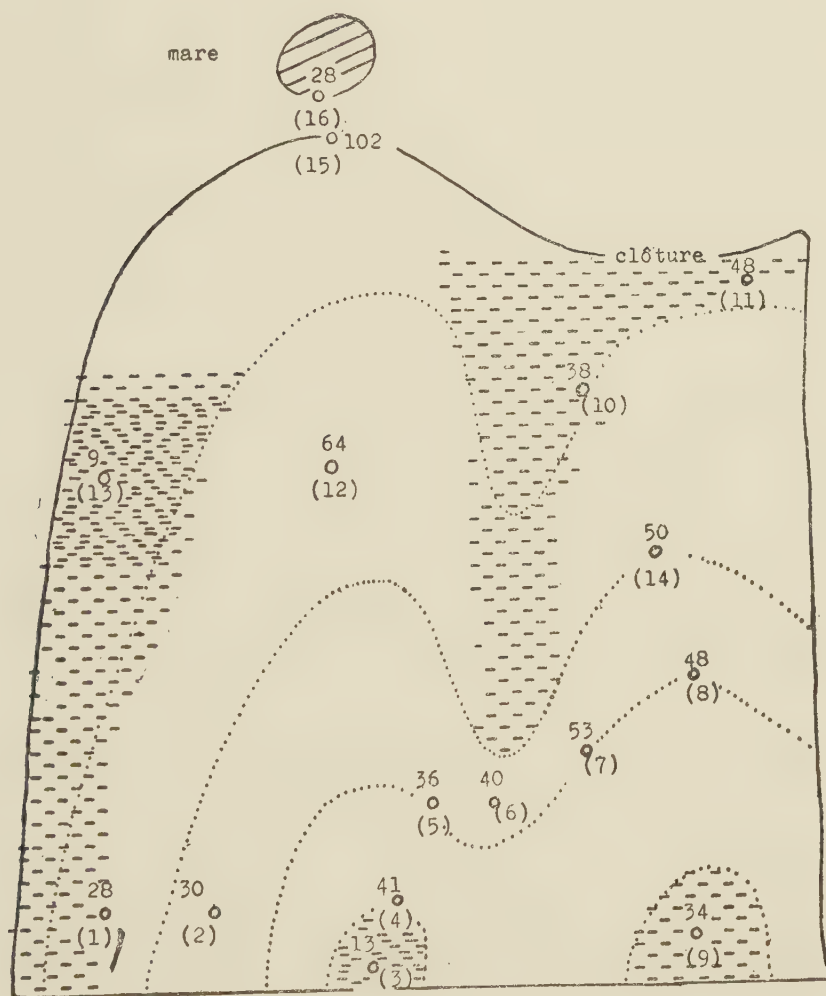


Fig. 1. Prélèvements de Saint Aubin sur Loire

Conclusion

Ces résultats montrent que la susceptibilité des sols humides est en général, peu élevée et nettement plus faible que celle des sols secs voisins.

Bien que les sols humides soient situés le plus souvent en bas de pente ou au fond d'un thalweg, cette différence de comportement ne doit pas être attribuée à l'érosion. En effet l'examen des «pierres et graviers» extraits des différents échantillons, permet souvent d'affirmer que le sol humide s'est développé sur la même roche-mère que le sol sec voisin. D'autre part, les sols secs formés aux dépens d'alluvions anciennes ne se distinguent pas au point de vue magnétique des sols secs développés sur les produits d'altération, in situ, des roches compactes. Quant aux alluvions récentes qui pourraient polluer les sols de ces bas-fonds, elles proviendraient de la couche superficielle des pentes voisines: nous verrons par les résultats de l'analyse granulométrique que l'entraînement des particules fines sur les pentes ne permet pas d'expliquer la diminution de susceptibilité constatée dans les bas-fonds.

En résumé, un réseau de prélèvements à larges mailles, couvrant des sols très diversifiés par la nature de la roche-mère, la topographie, la végétation, montre que les propriétés magnétiques de la couche superficielle ne sont pas liées étroitement à ces facteurs qui jouent un rôle important dans l'évolution des sols. On a constaté, par contre, que les sols très humides manifestent une susceptibilité peu élevée. Une étude systématique portant sur des sols voisins, et d'humidités différentes, a confirmé cette première observation. Le comportement magnétique du sol dépend des conditions d'humidité dans lesquelles il se trouve placé et, par suite, des différents facteurs qui commandent ces conditions. Des expériences réalisées au Laboratoire permettront de préciser ces conditions.

CHAPITRE VI

Fractionnement du sol: Triage Magnétique, analyse granulométrique

Après avoir constaté que le sol manifeste très souvent une susceptibilité relativement importante et, en général, plus élevée que celle de la roche-mère sous-jacente, j'ai cherché à identifier les constituants responsables de cette propriété en procédant à différents fractionnements.

Triage magnétique grossier. Examen minéralogique de la fraction attirable

Au moyen d'un aimant on peut extraire des échantillons de terre fine, séchée à l'air, une certaine quantité de grains attirables dont la proportion, variable d'un sol à l'autre, atteint parfois 2,5 % dans les sols bretons. Le Professeur BERTHOIS, de l'Ecole Nationale d'Ag-

riculture de Rennes, a bien voulu examiner quelques unes des fractions magnétiques ainsi séparées du sol. Après lavage à l'eau chaude et à l'acide chlorhydrique dilué à 50 %, les fractions extraites à l'aimant présentent les compositions suivantes à la loupe binoculaire.

N° 3 — Sol sur des alluvions magnétiques - Bolumet Pontivy.
Fraction attirable 2,5 %.

Quartz, en grains toujours émoussés; initialement ces grains étaient entourés d'un enduit d'hydroxyde de fer et d'argile.

Feldspath, beaucoup plus rare que le quartz, même enduit.

Limonite, assez abondante.

Schiste, métamorphique en grains anguleux ou peu usés.

Dolarites, en grains très roulés.

Micropoudingue, composé de grains de quartz souvent très roulés, de grains de séricitoschiste d'ilménite en grains très roulés.

N° 23 — Sol sur micaschiste Guégon. Fraction attirable 0,4 %

Après lavage cette fraction est composée essentiellement de fragments de toutes dimensions de micaschiste brun foncé, parfois bleuâtre (avec peut-être de la glaucophane); les grains sont anguleux ou roulés, parfois très fragiles, surtout ceux dont le mica est mordoré.

Quelques très rares grains de magnétite et de limonite.

N° 29 — Sol schisteux - Noyal-Pontivy. Fraction attirable 2 %.

Micaschiste, très dominant en grains de toutes tailles, le plus souvent émoussés, parfois extrêmement roulés et ovoïdes; l'altération est également très variable; on trouve:

1°) des grains très peu altérés à biotite et quartz,

2°) des grains où la biotite est partiellement décomposée par perte de son fer, elle a alors des reflets mordorés.

3°) des grains où la biotite est très décomposée; les grains sont alors très rubéfiés et recouverts plus ou moins complètement d'une croûte ferrugineuse.

Magnétite, en très petits grains noirs.

Ilménite, très rare.

Le Professeur BERTHOIS a noté que la fraction extraite à l'aimant contient, après lavage à l'acide chlorhydrique, une grande proportion de grains qui ne sont plus attirables; ces grains étaient initialement englobés dans un enduit ferrugineux magnétique.

Cette méthode permet donc de reconnaître la présence dans le sol de quelques éléments minéraux magnétiques que l'on trouve dans les roches, magnétite, ilménite, et d'une combinaison ferrugineuse magnétique, formée sur place, qui enrobe ici des débris minéraux non magnétiques et les rend attirables à l'aimant. Quant au micaschiste qui reste souvent attirable dans les extraits lavés, alors qu'il est peu magnétique dans les roches fraîches, on peut admettre que ses propriétés magnétiques sont dues à un remaniement du fer dans la masse de ces petits fragments, remaniement consécutif à l'altération de la biotite dans le sol.

Si l'on mesure la susceptibilité d'un échantillon avant et après ce triage magnétique grossier, on constate que cette opération n'a séparé qu'une fraction relativement faible des matériaux magnétiques du sol.

Sol n° 3 avant triage magnétique,	$\chi = 878$, après $\chi = 572$
Sol n° 21 avant » »	$\chi = 191$, après $\chi = 151$
Sol n° 29 avant » »	$\chi = 596$, après $\chi = 398$

Sur la terre séchée à l'air la séparation des grains attirables à l'aimant est très incomplète du fait que les éléments minéraux du sol sont souvent englobés dans des agrégats, plus ou moins cohérents, cimentés par des colloïdes argileux ou organiques. La mise en liberté des différentes particules exige la destruction de ces agrégats : c'est ce que l'on obtient par l'analyse mécanique.

Analyse granulométrique du sol

Après destruction des agrégats, le sol dispersé est fractionné par sédimentations successives d'après la grosseur des grains, suivant la méthode internationale (19).

L'analyse mécanique porte sur un échantillon de 20 g. de «terre fine». Lorsque le sol contient une proportion notable de matières organiques, celles-ci sont détruites à chaud par une solution diluée d'eau oxygénée. Après refroidissement la terre est lavée avec une solution d' $\text{HCl} \frac{N}{5}$, puis avec de l'eau distillée. La dispersion des colloïdes argileux est obtenue en agitant la terre dans un flacon avec une solution ammoniacale étendue.

Pour des grains sphériques de petit diamètre la vitesse de chute dans l'eau suit la loi de Stokes, et varie proportionnellement au carré du rayon ; le temps de chute sur une hauteur déterminée, calculé à partir de la formule de Stokes, permet une classification conventionnelle des différentes particules. Dans l'échelle internationale on distingue ainsi, le diamètre, d , des grains étant exprimé en millimètres:

Eléments dits "colloïdaux", fraction argileuse $d < 0,002$

"limon"	$0,002 < d < 0,020$
"sable"	$0,020 < d < 2,0 \text{ mm}$

Dans une première série de sédimentations on isole la fraction argileuse, qui reste en suspension, tandis que le sable et le limon se déposent. Les éléments "limoneux" sont ensuite séparés du "sable" par le même procédé. L'addition d'une petite quantité d'acide chlorhydrique entraîne une floculation rapide de l'argile. Les dépôts sont recueillis dans des capsules en porcelaine et séchés à l'étuve 100-105°.

Remarque — La vitesse de chute est calculée pour des grains sphériques de densité 2,65. Dans le sol les particules sont de toutes

formes et leur densité peut s'écarter assez nettement de la valeur moyenne adoptée. L'examen au microscope des grains doués d'une même vitesse de chute montre que leurs dimensions moyennes sont assez rapprochées de celles de la sphère utilisée pour le calcul.

L'analyse mécanique de plusieurs échantillons de la même "terre fine" donne des résultats très voisins, comme l'indique la série suivante :

Sol de Kerabevin en Kerfourn

	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
sable	8,78 g.	8,82 g.	8,75 g.	8,75
limon	6,16	6,17	6,18	6,08
argile	3,07	3,00	3,07	3,14
total	18,01 g.	17,99 g.	18,00 g.	17,97 g.

La perte de poids correspond à l'humidité de la terre fine séchée à l'air et aux matières organiques détruites au cours de l'analyse.

Susceptibilité magnétique des différentes fractions du sol

Une masse suffisante de terre fine ayant été soumise à l'analyse mécanique, les susceptibilités des différentes fractions sont mesurées par la méthode du magnétomètre. Les tableaux ci-dessous indiquent les compositions granulométriques des différents sols et la susceptibilité, évaluée en 10^{-8} u.e.m., de chaque fraction.

Sol schisteux. Kerabevin Kerfourn (Morbihan)

Susceptibilité de la terre fine avant l'analyse $\chi = 935$

	sables	limons	argiles
Composition	43,9 %	30,7 %	15,4 %
χ	534	505	3.515

Sol schisteux. Pluméliau (Morbihan)

Susceptibilité de la terre fine avant l'analyse $\chi = 1.860$

	sables	limons	argiles
Composition	31,7 %	23,0 %	12,4 %
χ	1.005	928	7,250

Sol granitique. Séglien (Morbihan)

Susceptibilité de la terre fine avant l'analyse $\chi = 160$

	sables	limons	argiles
Composition	43,2 %	13,2 %	9,1 %
χ	39	89	804

Sol schisteux-Gléné (Saône-et-Loire)

Susceptibilité de la terre fine avant l'analyse $\chi = 74$

	sable	limons	argiles
Composition	66,1 %	12,6 %	15,1 %
χ	35	63	91

Influence des différents traitements de l'analyse mécanique sur les propriétés magnétiques.

Au cours de l'analyse granulométrique la terre a été soumise à différents traitements mécaniques, physiques et chimiques. L'expérience montre qu'un séjour prolongé à l'étuve 100-105° d'une terre séchée à l'air ne modifie pas ses propriétés magnétiques. On retrouve également la susceptibilité initiale après l'action de l'eau oxygénée, par contre le traitement à l'acide chlorhydrique N/5 entraîne une diminution notable de la susceptibilité pouvant atteindre 30 %. Aussi lorsqu'on calcule, comme pour un mélange de poudres peu magnétiques, la susceptibilité globale à partir de la susceptibilité de chaque fraction et de la concentration, on trouve une valeur inférieure à celle trouvée sur l'échantillon avant l'analyse et la différence correspond à la diminution observée dans le traitement à l'acide chlorhydrique.

Analyse granulométrique de deux horizons d'un même profil

J'ai procédé pour le sol de Kerabevin à l'analyse mécanique de la couche superficielle comprise entre 0 et 20 cm. et à celle d'un horizon inférieur situé entre 40 et 60 cm.

Sol de Kerabevin-Kerfourn (Morbihan)

	entre 0 et 20 cm. $\chi = 934$	entre 40 et 60 cm. $\chi = 38$
sables	48,9 % $\chi = 534$	45,7 % $\chi = 22$
limons	30,7 % $\chi = 505$	35,7 % $\chi = 11$
argiles	15,4 % $\chi = 3.515$	16,9 % $\chi = 87$
humidité	2,6 %	1,6 %
Total	92,6	99,9

Déduction faite des matières organiques, assez abondantes dans la couche superficielle, ces deux horizons présentent des compositions granulométriques très voisines alors que la susceptibilité est trente fois plus élevée dans l'horizon situé entre 40 et 60 cm. ; dans l'horizon inférieur comme dans la couche superficielle la fraction fine est la plus magnétique.

Comparaison des résultats de l'analyse granulométrique pour des sols humides et des sols secs voisins

On a vu dans le chapitre précédent que les sols humides présentent une susceptibilité nettement inférieure à celle des sols secs voisins ; l'analyse mécanique montre que cette différence de susceptibilité ne peut pas s'expliquer par une différence dans la composition granulométrique.

Série de Kerfourn (Morbihan)

Bas-fond $\chi = 24$	Sables	49,7 %	$\chi \simeq 40$
	Limons	31,2 %	$\chi \simeq 40$
	Argiles	10,6 %	$\chi \simeq 100$
	Humidité	1,7 %	
	Total	93,2	
Bas de pente $\chi = 576$	Sables	44,7 %	$\chi \simeq 600$
	Limons	30,9 %	$\chi \simeq 300$
	Argiles	18,0 %	$\chi \simeq 2.500$
	Humidité	2,6 %	
	Total	91,2	
Dans la pente $\chi = 856$	Sables	44,2 %	$\chi \simeq 600$
	Limons	29,8 %	$\chi \simeq 300$
	Argiles	15,2 %	$\chi \simeq 3.500$
	Humidité	2,6 %	
	Total	91,8	

Les susceptibilités des différentes fractions ont été mesurées ici, comme dans le cas suivant, avec l'appareil à induction sur des masses relativement faibles de sorte que j'ai indiqué seulement les ordres de grandeur.

Analyse granulométrique effectuée sur un fond de thalweg pollué par des apports provenant des pentes voisines

Sur des terrains labourés et présentant des pentes accentuées l'érosion peut être importante ; une série de prélèvements, effectuée dans un terrain schisteux vallonné, fournit un exemple où les effets de l'érosion se superposent aux effets de l'humidité sur la susceptibilité du sol.

Thalweg de Coët-Codo en Pluméliau (Morbihan). Les points de prélèvements sont indiqués sur la figure n° 2. Quatre prélèvements, n° 514, 515, 516, 517, sont alignés en terre cultivée suivant une coupe de vallon. Un échantillon, n° 518, a été recueilli dans une zone humide, sous prairie, au fond du thalweg, au-dessous du n° 516. La pente, très accusée entre les n° 516 et 517, est moins prononcée sur l'autre versant, entre les n° 516, 515 et 514.

n° 514 $\chi = 364$	Sables	50,2 %	$\chi \simeq 200$
	Limons	24,2 %	$\chi \simeq 220$
	Argiles	18,7 %	$\chi \simeq 2.000$
	Humidité	2,8 %	
	Total	90,4	
n° 515 $\chi = 536$	Sables	50,4 %	$\chi \simeq 200$
	Limons	24,0 %	$\chi \simeq 250$
	Argiles	13,9 %	$\chi \simeq 2.500$
	Humidité	2,7 %	
	Total	91,0	

Thalweg de Coët-Codo. Pluméliau, Morbihan

Les courbes de niveau sont représentées en pointillé, la zone très humide est indiquée par des traits interrompus

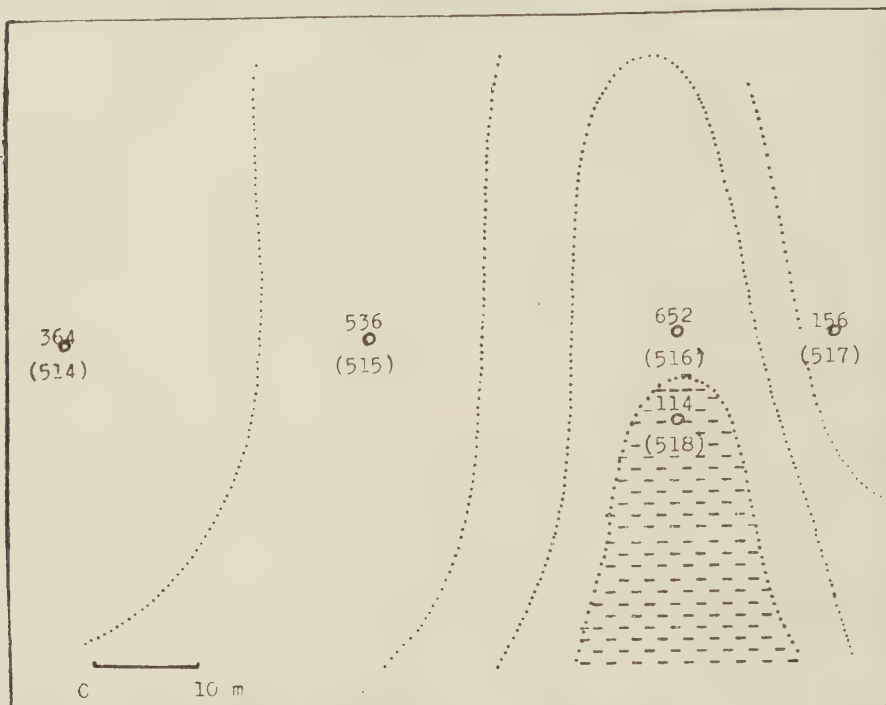


Fig. 2. Thalweg de Coët-Codo. Pluméliau, Morbihan

n° 516 $\chi = 652$	Sables	49,5 %	$\chi \approx 300$
	Limons	23,4 %	$\chi \approx 400$
	Argiles	13,9 %	$\chi \approx 4.000$
	Humidité	2,7 %	
	Total	89,5	
n° 517 $\chi = 156$	Sables	60,0 %	$\chi \approx 100$
	Limons	19,9 %	$\chi \approx 200$
	Argiles	10,9 %	$\chi \approx 1.200$
	Humidité	1,9 %	
	Total	92,7	
n° 518 $\chi = 114$	Sables	40,8 %	$\chi \approx 50$
	Limons	24,3 %	$\chi \approx 150$
	Argiles	15,3 %	$\chi \approx 500$
	Humidité	4,3 %	
	Total	84,2	

La susceptibilité du sol humide, bien que plus faible que celle des sols secs voisins, est ici relativement importante; l'analyse mécanique montre que ce sol a été enrichi en particules fines par des apports provenant surtout du versant Ouest, plus abrupt. Corrélativement les propriétés magnétiques du sol sur ce versant sont moins marquées que celles que l'on observe sur le versant opposé où la pente est plus faible et l'érosion moins active.

Susceptibilité de la fraction "pierres et graviers".

Les "pierres" et les "graviers", de diamètre supérieur à 2 mm, sont constitués essentiellement par des débris plus ou moins altérés de la roche-mère; ils se trouvent dans le sol en proportions variables, le plus souvent moins de 10 %. Leur susceptibilité se présente généralement de la manière suivante :

Sol granitique. Sainte-Marine (Finistère)

Terre fine $\chi = 535$ Graviers $\chi = 25$ Granite compact $\chi = 4$

Sol schisteux. Gléné (Saône-et-Loire)

Terre fine $\chi = 74$ Graviers $\chi = 28$ Schiste compact $\chi = 14$

Les propriétés magnétiques des "pierres et graviers" se rapprochent le plus souvent de celles de la roche-mère compacte et dans la plupart des cas cette fraction du sol n'a qu'un rôle peu important dans la susceptibilité globale. Cependant les exemples ci-dessous montrent que l'influence des "graviers" peut devenir considérable lorsque le sol s'est développé sur des formations magnétiques.

Le nouveau terrain de sports de Pontivy a été aménagé sur des alluvions contenant des "graviers" magnétiques qui ont recouvert le schiste d'un dépôt dont l'épaisseur atteint plusieurs mètres par endroits.

Nouveau terrain de sports de Pontivy

Susceptibilité de la "terre fine" et des "graviers"

Profondeur	"Terre fine"		"Graviers"	
	Proportion	χ	Proportion	χ
0—30 cm	90 %	500	10 %	758
30—55 cm	87 %	20	13 %	9
55—85 cm	76 %	84	24 %	108
85—115 cm	78 %	81	22 %	72
115—145 cm	72 %	166	28 %	94
145—175 cm	60 %	182	40 %	86
175 cm	92 %	109	8 %	88

Le sol de La Minière, Seine-et-Oise, s'est formé sur un limon de faible épaisseur recouvrant des sables de Lozère dont la susceptibilité est importante.

Sol de La Minière (Seine-et-Oise)

Susceptibilité de la "terre fine" et des "graviers"

Profondeur	"Terre fine"		"Graviers"	
	Proportion	χ	Proportion	χ
0—20 cm	75 %	38	25 %	644
20—35 cm	65 %	44	35 %	211
35—50 cm	60 %	25	40 %	331
50—65 cm	65 %	23	35 %	304

En général, on trouve des résultats comparables en déterminant la susceptibilité sur le sol brut et sur la terre fine tamisée; ce dernier cas montre que les valeurs observées peuvent être très diffé-

rentes quand le sol s'est développé sur une formation contenant des sables magnétiques.

Viscosité magnétique des différentes fractions

Les susceptibilités des différentes fractions séparées par l'analyse mécanique ont été mesurées le plus souvent avec le magnétomètre. Cette méthode, qui permet de suivre les variations de l'aimantation induite en fonction du temps, fait apparaître dans les diverses fractions du sol une viscosité magnétique généralement très marquée (voir p. 26).

Pour tenir compte de cette propriété, la susceptibilité des produits examinés au magnétomètre a été déterminée à partir de l'aimantation induite acquise par l'échantillon 8 minutes après l'établissement du champ. Il m'a paru intéressant de procéder simultanément à la comparaison des viscosités des différents échantillons de la manière indiquée précédemment : les positions du spot sur l'échelle du magnétomètre ayant été notées 1 minute et 5 minutes après l'établissement du champ, je conviens de caractériser le trainage par le rapport du déplacement $\Delta\theta$ observé pendant ces 4 minutes à la déviation θ due à l'aimantation induite acquise par l'échantillon au bout de 8 minutes. Les tableaux ci-dessous indiquent le trainage observé de cette façon sur les fractions extraites de différents sols.

	Fraction	χ	θ en mm	$\Delta\theta$ en mm	$\frac{\Delta\theta}{\theta}$
terre de Pluméliau	sables	1.005	169,2	3,0	$\frac{18}{1.000}$
	limons	928	92,2	1,8	$\frac{20}{1.000}$
	argiles	7.250	268,1	8,3	$\frac{31}{1.000}$
	terre fine	1.860	225,6	5,6	$\frac{25}{1.000}$
terre de Kerabevin	sables	534	98,0	2,1	$\frac{21}{1.000}$
	limons	505	67,6	1,2	$\frac{18}{1.000}$
	argiles	3.515	184,0	4,4	$\frac{31}{1.000}$
terre de Séglien	sables	89	32,1	0,8	$\frac{25}{1.000}$
	limons	89	41,7	0,7	$\frac{17}{1.000}$
	argiles	804	360,4	10,5	$\frac{29}{1.000}$
terre de Saône et Loire	sables	85	25,3	pas appréciable	
	limons	63	27,3	"	"
	argiles	91	87,8	0,7	$\frac{20}{1.000}$

La viscosité est plus marquée avec les fractions argileuses mais elle reste souvent importante dans le cas des sables et des limons.

Conclusion

L'analyse granulométrique des sols permet de constater que la fraction la plus fine est beaucoup plus magnétique que les autres fractions sauf dans le cas des sols formés sur des sables magnétiques ; lorsque la susceptibilité du sol est importante elle provient, pour la plus grande part, de la fraction argileuse dont la concentration dans les sols examinés est inférieure à 16 %. Une partie des constituants magnétiques du sol, de l'ordre de 20 %, peut être détruite au cours de l'analyse par le traitement à l'acide chlorhydrique N/5, mais cette destruction n'entraîne pas de modification dans l'ordre des susceptibilités pour les différentes fractions puisqu'elle atteint surtout les particules fines qui sont les plus magnétiques.

L'analyse mécanique montre que la différence de susceptibilité observée entre la couche superficielle et un horizon inférieur n'est pas liée à une différence dans la composition granulométrique ; de même des sols secs et des sols humides voisins peuvent avoir des propriétés magnétiques très différentes alors qu'ils présentent des compositions granulométriques analogues. Etant donnée leur situation topographique, bas de pente, fond de thalweg, les sols humides peuvent être pollués par des apports de particules entraînées sur les pentes situées à proximité par les eaux de ruissellement. Il résulte de l'analyse mécanique que cet entraînement, gêné par la végétation, est très faible sur les terrains en pente douce ; sur les pentes labourées, où cet entraînement présente une certaine importance, il intéresse surtout les particules fines, ce qui tend à diminuer la susceptibilité sur les pentes et à l'augmenter dans les bas-fonds. Malgré cette tendance contraire des effets de l'érosion les sols humides ont une susceptibilité plus faible que les sols secs voisins, ce qui établit nettement l'influence de l'humidité sur les propriétés magnétiques du sol.

Quand le sol s'est formé sur des roches-mères peu magnétiques, les "pierres" et les "graviers", qui restent sur le tamis de 2 mm., n'ont qu'une faible influence sur la susceptibilité globale du sol. Les propriétés de cette fraction, intermédiaires entre celles des «sables» et celles de la roche-mère compacte, seront examinées à nouveau avec l'étude de la fraction «sables».

Les différentes fractions séparées par l'analyse granulométrique présentent une viscosité magnétique appréciable ; cette propriété, qui appartient seulement à certaines combinaisons ferrugineuses, sera utilisée dans les recherches effectuées en vue d'identifier le constituant responsable des propriétés magnétiques du sol.

CHAPITRE VII

Propriétés magnétiques des produits d'altération des roches

L'examen minéralogique de la fraction attirable à l'aimant permet de déceler dans le sol la présence, en proportions variables, de minéraux magnétiques provenant de l'altération de la roche-mère.

Afin de préciser le rôle joué par ces débris minéraux dans les propriétés magnétiques du sol j'ai étudié sur quelques exemples la variation de la susceptibilité des roches au cours de l'altération; je me placerai ici dans le cas où l'altération se produit à l'écart de la vie organique sous l'influence de facteurs physico-chimiques. La transformation des roches se poursuit dans le sol où des facteurs biologiques viennent s'ajouter aux précédents; les observations relatives à la fraction argileuse du sol permettent d'interpréter l'évolution des propriétés magnétiques des roches au cours de cette dernière phase qui sera étudiée avec la fraction "sables".

Quelques auteurs ont déjà signalé que l'altération peut entraîner des variations importantes dans la susceptibilité des roches (27), (46), (52), (53).

L'étude des modifications de la susceptibilité provoquées par l'altération présente une double difficulté :

1°) Les roches sont magnétiquement très hétérogènes et deux échantillons de roche fraîche prélevés en deux points différents d'une même carrière ont souvent des propriétés magnétiques nettement différentes alors que, pour le pétrographe, les échantillons paraissent identiques; pour limiter au maximum les conséquences de cette hétérogénéité les échantillons de roche fraîche et de roche altérée doivent être prélevés en des points aussi voisins que possible.

2°) Pour apprécier correctement l'altération il faut soumettre les échantillons à des examens variés : plaques minces, analyse thermique différentielle, analyse chimique. M. HENIN m'a procuré quelques spécimens dont l'altération a fait l'objet d'une étude détaillée; le plus souvent j'ai classé les échantillons d'après les observations faites sur le terrain, situation, aspect, cohésion, etc...

Altération d'un gabbro, Carrière du Gallion, Guyane

Cet échantillon, détaché d'un bloc de Gabbro ophitique, a été étudié par S. CAILLERE et S. HENIN (6) qui ont distingué quatre fractions à partir du centre : roche fraîche, zone blanchâtre, partie brunnâtre, croûte extérieure. L'examen en plaque mince montre que les minéraux essentiels de la roche fraîche sont le plagioclase Labrador et l'augite associée à l'olivine; on trouve comme minéraux accessoires l'ilménite et la biotite.

Dans la zone blanchâtre des fissures plus ou moins remplies par des dépôts ferrugineux opaques se sont produites dans le labrador et le pyroxène. La partie brunâtre se présente comme une masse ferrugineuse opaque où l'on reconnaît des nids de kaolinite et des agrégats d'hydrargillite.

La comparaison des résultats de l'analyse chimique effectuée sur la roche fraîche et sur la croûte externe fait apparaître, dans le produit d'altération, une perte importante en silice, chaux, magnésie, oxydes alcalins.

	Roche	Produit d'altération
SiO ₂	48,57	12,07
Al ₂ O ₃	13,71	28,75
Fe ₂ O ₃	6,10	30,40
FeO	9,30	3,55
MnO	0,21	0,11
CaO	10,10	0,90
MgO	6,44	1,00
Na ₂ O	1,86	0,25
K ₂ O	0,40	0,25
TiO ₂	1,60	2,85
P ₂ O ₅	0,29	0,30

La composition minéralogique du produit d'altération, calculée à partir des données de l'analyse, correspond à une argile latéritique :

Gabbro	9,5
Kaolinite	15,5
Hydrargillite	38
Goethite	34
Eau hygroscopique	2,5
Ilménite	5

Les mesures de susceptibilité effectuées sur les différentes fractions ont donné les résultats ci-dessous :

Fractions	Susceptibilité (en 10 ⁻⁶ u.e.m.)
Roche fraîche	1.800
Zone blanchâtre	800
Partie brunâtre	1.580
Croûte externe	1.510

Les observations de S. CAILLÈRE et S. HENIN conduisent à interpréter les modifications de la susceptibilité au cours des différentes phases de l'altération de la manière suivante :

La susceptibilité de la roche fraîche est due à l'ilménite et aux minéraux ferromagnésiens, augite et olivine. L'ilménite résiste à l'altération tandis que les minéraux ferromagnésiens sont décomposés, leur fer passant à l'état de Fe₂O₃, plus ou moins hydraté, peu mag-

nétique ; il en résulte une diminution de la susceptibilité au cours de la première phase d'altération. Dans la fraction extérieure, une altération plus poussée se traduit par un départ important de silice, de chaux et de magnésie, ce qui entraîne une augmentation de la concentration en alumine, en oxyde de fer Fe_2O_3 et en ilménite. L'accroissement de la concentration en ilménite permet de comprendre pourquoi la susceptibilité de la croûte externe est supérieure à celle de la zone blanchâtre et même à celle de la roche fraîche. Cette interprétation est confirmée par l'analyse granulométrique de la partie la plus altérée :

	Sables	Limons	Argiles
Proportions	86,4 %	8,9 %	2,2 %
Susceptibilités	2.036	188	6

Le constituant magnétique du produit d'altération se trouve presque entièrement dans la fraction "sables" ; sa viscosité magnétique est très faible, $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ de l'ordre de $\frac{3}{1.000}$.

Amphibolite, île de Cayenne. Une interprétation analogue permet d'expliquer la différence de susceptibilité entre la fraction fraîche et la fraction altérée d'une amphibolite prélevée dans l'île de Cayenne ; l'altération de cet échantillon est encore du type latéritique (6).

Fractions	Susceptibilités
Partie centrale, peu altérée	950
Partie externe, très altérée	1.300

Dans les exemples suivants le processus de l'altération n'a pas été étudié.

Diabase, Belle Plante, Ernée, Mayenne. Cet échantillon de diabase altérée en boule m'a été fourni par l'Institut de Géologie de Rennes.

Fractions	Susceptibilités
Partie centrale, peu altérée	703
Partie externe, très altérée	718

Diabase, route de Gausson à Plouguenast, C. d. N.

	Fractions	Susceptibilités
Echantillon n° 1	{ Roche fraîche	861
	{ Fraction très altérée	221
Echantillon n° 2	{ Fraction peu altérée	40
	{ Fraction très altérée	24

La susceptibilité des échantillons de schistes et de granites que j'ai prélevés en Bretagne est extrêmement faible, $\chi < 20$, et je n'ai pas décelé de modification appréciable de la susceptibilité au cours de l'altération.

Latérites

Les latérites sont des formations qui se développent dans les pays tropicaux humides aux dépens des roches cristallines suivant un mécanisme encore mal connu. Elles sont caractérisées par une concentration élevée en alumine et elles contiennent généralement une proportion importante d'oxyde de fer qui prend souvent la forme de concrétions. La susceptibilité des latérites, variable d'un cas à l'autre, est souvent très faible malgré leur richesse en fer.

Echantillons de latérite prêtés par le Muséum.

n° 688	Latérite de Gabbro, Kakoulima, Guinée	$\chi = 23$
n° 702	Latérite de Gabbro, Kakoulima, Guinée	$\chi = 44$
n° 726	Latérite de Diabase, Bougounou, Guinée	$\chi = 4$
n° 727	Latérite de Diabase, Bougounou, Guinée	$\chi = 170$
n° 727 ^b	Latérite de Diabase, Bougounou, Guinée	$\chi = 260$
n° 797	Latérite gibbsitique de Diabase, Analomagastré	$\chi = 2,320$
n° 798	Diabase à hornblende en voie de trans- formation en latérite gibbsitique, Ana- lomagastré	$\chi = 1.280$

Echantillon fourni par M. HENIN.

Latérite, Tsimbazaza, Madagascar	$\chi = 400$
----------------------------------	--------------

Cet échantillon a été soumis à l'analyse granulométrique.

Fractions	Sables	Limons	Argiles
Proportions	60,0 %	20,1 %	17,9 %
Susceptibilités	714	16	16

Les résultats obtenus avec cette latérite sont analogues à ceux que l'on a observés avec le produit d'altération latéritique du Gabbro du Gallion, Guyane : les propriétés magnétiques appartiennent essentiellement à la fraction "sables", le traînage est très faible $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3}{1.000}$.

Les échantillons du Muséum n° 797 et 798 présentent une évolution de la susceptibilité comparable à celle que l'on a constaté sur le Gabbro du Gallion : la deuxième phase d'altération est plus magnétique que la première. Les autres échantillons n'ont qu'une faible susceptibilité.

Conclusion

Cette étude très incomplète, et que je me propose de poursuivre, montre que la susceptibilité des produits d'altération est souvent très différente de celle de la roche fraîche ; le sens de la variation dépend de la nature des constituants magnétiques de la roche et du mode d'altération.

Les minéraux ferromagnésiens, amphiboles et pyroxènes, se décomposent assez facilement et perdent alors leurs propriétés magnétiques : le fer de ces minéraux prend une forme Fe_2O_3 hydratés, peu magnétique. Au contraire la magnétite et l'ilménite résistent bien à l'altération surtout quand les dimensions des grains sont assez grandes ; on les trouve souvent dans les sables et, sur certaines plages, on rencontre parfois des zones où ces minéraux se sont accumulés par suite de leur grande densité. Signalons également que ces minéraux "lourds" sont quelquefois associés dans les alluvions à des particules d'or, ce qui a permis une application inattendue de la méthode magnétique à la recherche des terrains aurifères.

D'autre part l'altération des roches ne se limite pas à une transformation sur place des minéraux ; elle est accompagnée de migrations qui intéressent particulièrement les oxydes fortement basiques, K_2O , Na_2O , CaO , MgO ainsi que la silice. Il en résulte une augmentation de la concentration en alumine, en oxyde de fer Fe_2O_3 , en magnétite et en ilménite dans les produits d'altération restés sur place.

Au point de vue des propriétés magnétiques on peut donc envisager les cas suivants :

a) Si les minéraux magnétiques de la roche fraîche sont essentiellement des minéraux ferromagnésiens la susceptibilité aura tendance à diminuer au cours de l'altération même quand la concentration en fer total augmente,

b) Si les minéraux magnétiques de la roche fraîche sont constitués surtout par la magnétite et l'ilménite la susceptibilité de la roche altérée sera souvent supérieure à celle de la roche fraîche par suite d'une augmentation de la concentration de ces minéraux,

c) Lorsque ces deux types de constituants participent aux propriétés magnétiques de la roche fraîche on pourra constater une diminution de la susceptibilité au cours de la première phase d'altération, caractérisée par une décomposition dont les produits restent sur place, puis une augmentation de la susceptibilité au cours d'une phase ultérieure pendant laquelle les migrations sont importantes,

d) dans le cas des roches peu magnétiques l'altération ne provoquera pas une modification appréciable de la susceptibilité : le fer qu'elles contiennent, généralement sous forme de silicates, donne du sesquioxyde Fe_2O_3 hydraté, peu magnétique.

Ces hypothèses permettent d'interpréter les différentes observations relatives aux produits d'altération des roches, lorsque la transformation se déroule à l'abri de la vie organique : sous l'influence de l'altération la susceptibilité tend à diminuer comme l'ont remarqué les auteurs cités au début de ce chapitre ; seules les roches contenant des minéraux magnétiques peu altérables, comme la magnétite et l'ilménite, semblent capables de fournir des produits d'altération plus magnétiques que la roche initiale à la suite d'un départ important

d'éléments non magnétiques (cas du Gabbro et de l'Amphibolite étudiés ci-dessus).

Les différences constatées entre les propriétés magnétiques des divers échantillons de latérite s'expliquent également en admettant que ces propriétés sont dues essentiellement à des fragments de magnétite et d'ilménite provenant de la roche-mère.

Quand on compare les propriétés des sols à celles des produits d'altération des roches, on constate que pour ceux-ci les "argiles" et les "limons" ont une susceptibilité très faible devant celle de la fraction "sables", tandis que pour les sols on observe l'ordre inverse, la fraction "argiles", étant de loin la plus magnétique.

Au point de vue de la viscosité magnétique le comportement des produits d'altération est également très différent de celui des sols : dans le cas des sols le traînage, très marqué avec les "argiles", est encore important avec les "sables", dans le cas de produits d'altération le traînage est insignifiant pour toutes les fractions.

CHAPITRE VIII

Constituant magnétique de la fraction argileuse du sol

Des chapitres précédents il résulte que :

1°) les propriétés magnétiques du sol se manifestent principalement dans l'horizon humifère supérieur,

2°) le comportement au point de vue magnétique des fractions recueillies dans l'analyse mécanique est très différent pour cette couche superficielle et pour les produits fournis par l'altération des roches, lorsque celle-ci ne fait intervenir que de facteurs physico-chimiques.

On est ainsi conduit à attribuer les propriétés magnétiques du sol à deux types de constituants : des minéraux magnétiques, provenant des roches altérées, que l'on trouve surtout dans la fraction "sables" et une combinaison ferrugineuse magnétique qui se forme seulement dans l'horizon humifère supérieur et que l'on trouve surtout dans la fraction "argiles". L'importance relative de chacun de ces deux types de constituants est variable d'un sol à l'autre, mais, le plus souvent, les propriétés magnétiques de la couche superficielle sont dues essentiellement à une combinaison du second type.

Propriétés du constituant magnétique de la fraction argileuse du sol.

L'analyse chimique permet de constater que la concentration de cette combinaison ferrugineuse est très faible même dans les argiles très magnétiques. Quand on traite la fraction argileuse par la méthode de déferrification de Deb (15) la perte en fer est seulement de l'ordre de quelques pour cent tandis que la susceptibilité des échantillons diminue dans des proportions considérables.

Susceptibilité des échantillons déferrifiés par la méthode de Deb

	Avant déferrification	Après déferrification
"Argile" d'un sol de Pluméliau	$\chi = 7.250$	$\chi = 1.608$
"Argile" d'un sol de Kerabevin	$\chi = 3.518$	$\chi = 690$
"Argile" d'un sol de Saône-et-Loire	$\chi = 91$	$\chi = 18$

Au lieu de soumettre à ce traitement déferrifiant la fraction "argiles", on peut traiter la fraction "limons" ou la terre fine elle-même.

	Avant déferrification	Après déferrification
"Limons" d'un sol de Kerabevin	$\chi = 631$	$\chi = 104$
Sol de Kerabevin	$\chi = 985$	$\chi = 52$
Sol de Pluméliau	$\chi = 1.860$	$\chi = 35$
Sol de Saône-et-Loire	$\chi = 91$	$\chi = 13$
Sol de Maneguegan	$\chi = 160$	$\chi = 8$

Il résulte de ces expériences que la susceptibilité de la fraction argileuse et celle de l'horizon humifère proviennent pour la plus grande part d'une substance ferrugineuse très facile à dissoudre ; étant donnée sa faible concentration cette combinaison doit posséder une susceptibilité très élevée.

Si l'on compare les courbes fournies par l'analyse thermique différentielle de l'argile du sol de Pluméliau avant et après déferrification, fig. n° 3 et 4, on observe un crochet exothermique vers 700° sur le graphique relatif à l'argile initiale tandis que ce crochet a disparu après déferrification.

D'autre part au cours de ce chauffage le constituant magnétique de l'argile a été détruit : la susceptibilité qui était initialement de l'ordre de 7000, est tombée aux environs de 100 après l'analyse thermique.

Le constituant magnétique de la fraction argileuse apparaît ainsi comme une substance ferrugineuse facile à dissoudre, de susceptibilité très élevée, présentant un trainage important, instable à chaud se transformant totalement à moins de 1.000° en un composé peu magnétique. Sa faible concentration dans les argiles les plus magné-

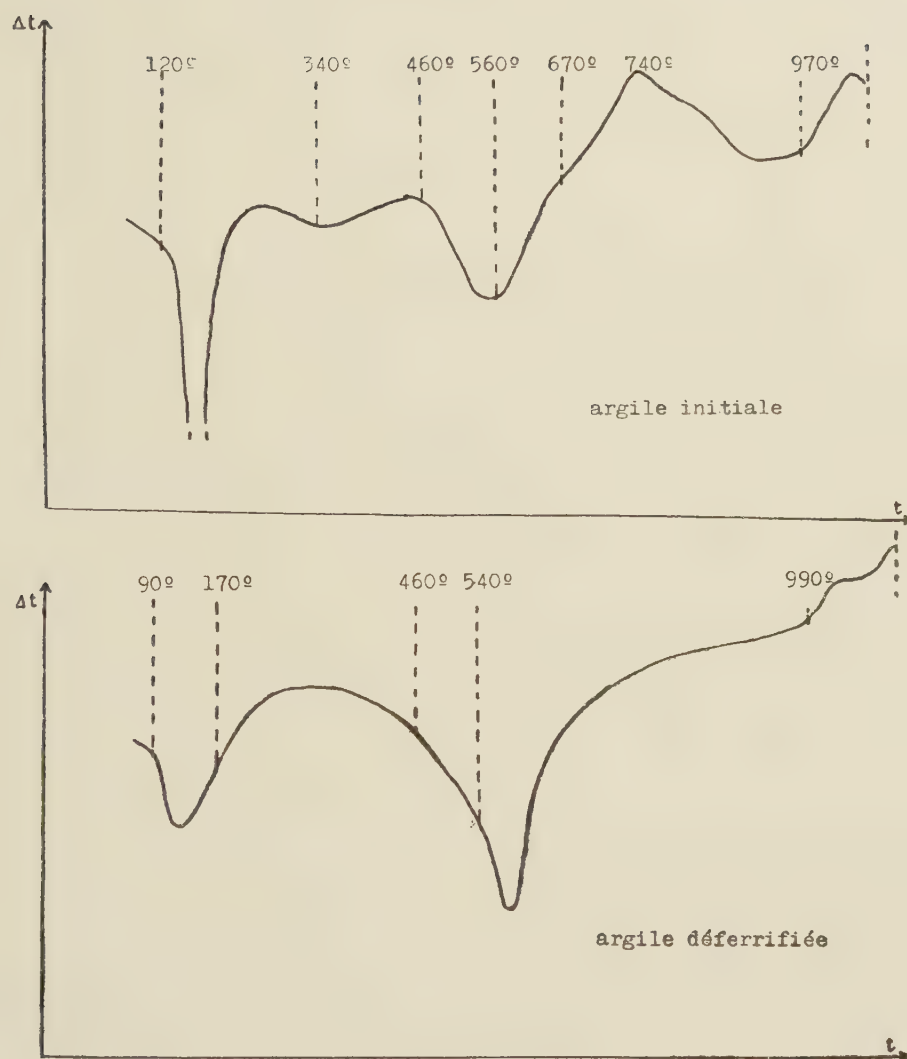


Fig. 3 et 4.

tiques ne permet pas l'identification de cette substance par des méthodes directes : analyse chimique, diagramme X, etc... Il est d'autre part difficile d'obtenir un produit enrichi en matériaux magnétiques, celui-ci étant étroitement associé à des particules argileuses. Dans ces conditions j'ai cherché à reconnaître la nature de ce constituant en comparant son comportement à celui des différentes combinaisons du fer qui pourraient se former dans le sol.

Propriétés des oxydes de fer

Au fer correspondent trois oxydes : FeO , oxyde ferreux, Fe_2O_3 , oxyde ferrique ou sesquioxyde de fer, et Fe_3O_4 magnétite, ou oxyde salin, qui peut être considéré comme une combinaison des deux premiers Fe_2O_3 , FeO , ferrite ferreux.

Les hydroxydes $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sont peu solubles, l'hydroxyde ferreux à partir de pH 6, l'hydroxyde ferrique à partir de pH 3,5.

L'oxyde et les sels ferreux s'oxydent facilement pour donner des composés ferriques tandis que des réducteurs permettent d'obtenir la transformation inverse. Suivant les conditions, l'oxyde salin Fe_3O_4 peut se former soit au cours de l'oxydation de l'oxyde ferreux, soit au cours de la réduction de l'oxyde ferrique.

L'oxyde ferreux n'existe pas à l'état naturel. On le prépare, à une température supérieure à 570° , par oxydation du fer par la vapeur d'eau, ou par réduction de l'oxyde salin par l'hydrogène ou l'oxyde de carbone. Il n'est pas ferromagnétique.

Le sesquioxyde Fe_2O_3 sous ses deux formes, Fe_2O_3 α -rhomboédrique et Fe_2O_3 γ cubique, et la magnétite, tous ferrimagnétiques, ont été étudiés par un grand nombre d'auteurs. Au récent Colloque de Ferromagnétisme et d'Antiferromagnétisme de Grenoble (1950) les connaissances acquises sur leurs propriétés ont été exposées notamment par R. CHEVALLIER (13), Ch. GUILLAUD (28), A. MICHEL, G. CHAUDRON et J. BENARD (42), J. L. SNOEK (48).

Des travaux consacrés à ces oxydes je retiendrai surtout les résultats susceptibles d'expliquer le comportement du sol au point de vue de l'aimantation induite.

Oxyde ferrique $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$. Le sesquioxyde peut être préparé par précipitation d'un sel ferrique suivie d'une déshydratation ou par décomposition de sels de fer sous l'action de la chaleur en atmosphère oxydante.

C'est un composé faiblement "ferromagnétique"; sa susceptibilité, à la température ordinaire, est voisine de $20 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. pour les échantillons de grande pureté. On a remarqué les échantillons préparés à partir de produits précipités présentent souvent une susceptibilité nettement supérieure, de l'ordre de $200 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. Cette différence est attribuée à la présence dans les produits précipités de faibles quantités d'oxyde cubique.

A l'état naturel on trouve le sesquioxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ anhydre sous forme d'oligiste ou d'hématite rouge, hydraté sous forme de goethite, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, qui donne par déshydratation $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$, et sous forme de variétés plus ou moins colloïdales.

Les susceptibilités indiquées par GRENET (25) HERROUN et WILSON

(in Grenet) pour ces produits naturels sont variables d'un échantillon à l'autre, mais toujours faibles : χ compris entre 9 et $1\,140 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. pour six échantillons d'oligiste, $\chi \simeq 7 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. pour l'hématite rouge et l'hématite brune, $\chi = 360$ pour un échantillon de goethite, χ compris entre 27 et $220 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. pour sept échantillons de limonite.

Oxyde Ferrique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$. L'oxyde ferrique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ se prépare généralement par oxydation de la magnétite Fe_3O_4 vers 200° ; on l'obtient également par déshydratation de la lépidocrocite $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

A l'état pur l'oxyde cubique, $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, se transforme vers 300° en sesquioxyde rhomboédrique, $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$, par une réaction fortement exothermique; il donne très facilement des solutions solides avec plusieurs oxydes métalliques et sa stabilité peut être profondément modifiée par la présence de faibles quantités d'oxydes étrangers: c'est ainsi qu'avec de l'oxyde de sodium dans une proportion de l'ordre de 1 % la température de la transformation devient supérieure à 700° (41).

Chauffé sous vide l'oxyde cubique perd de l'oxygène et donne de la magnétite :



Au point de vue magnétique l'oxyde cubique est ferrimagnétique et se rapproche de la magnétite. CHEVALLIER a trouvé une susceptibilité de $20\,000 \cdot 10^{-6}$ dans un champ de 174 oersted (9); la mesure effectuée par GRENET (25) sur l'oxyde ferrique ferromagnétique de ABRAHAM et PLANIOL (1) a donné comme résultat :

$$\chi = 59\,000 \cdot 10^{-6} \text{ u.e.m.}$$

Signalons que l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, qui intéressait déjà les techniciens comme substance semi-conductrice à forte perméabilité, est à la base d'un procédé d'enrichissement, par triage magnétique, d'un minerai de fer, la Taconite; ce procédé vient d'être mis au point au Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, U.S.A. (50).

Mesures de susceptibilité et de traînage effectuées sur des échantillons d'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$. G. GUILLAUD et A. MICHEL ont bien voulu me fournir des échantillons d'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ préparés dans leurs laboratoires.

J'ai d'abord déterminé la susceptibilité de ces échantillons dans un champ d'une dizaine d'oersted avec l'appareil à induction.

Echantillons de C. GUILLAUD

n° 1 Oxyde	en grains de 15 à 20 μ	$\chi \simeq 34\,000 \cdot 10^{-6}$
n° 2 Oxyde	en grains ultramicroscopiques	$\chi \simeq 17\,000 \cdot 10^{-6}$

Echantillons de A. MICHEL

n° 3 Oxyde		$\chi \simeq 38\,000 \cdot 10^{-6}$
n° 4 Oxyde	stabilisé par la soude	$\chi \simeq 29\,000 \cdot 10^{-6}$

Pour ces mesures les échantillons ont la forme de cylindres très allongés et sont disposés suivant l'axe de l'appareil : dans ces conditions l'influence du champ démagnétisant des échantillons est très réduite pour des susceptibilités de cet ordre.

Les valeurs trouvées sont voisines pour les échantillons n° 1 et 3 ; la susceptibilité est un peu plus faible pour l'échantillon n° 3 stabilisé par la soude. En comparant les valeurs relatives aux échantillons n° 1 et 2 on constate un abaissement important de la susceptibilité quand le diamètre des grains diminue, phénomène déjà observé par différents auteurs.

On retrouve ces résultats en mesurant au magnétomètre la susceptibilité de mélanges préparés en diluant les échantillons précédents avec du sable de susceptibilité négligeable. Cette méthode permet en outre d'observer le traînage, caractérisé par le rapport $\frac{\Delta\theta}{\theta}$. J'ai porté également dans le tableau ci-dessous la valeur de la susceptibilité du mélange, calculée en appliquant la loi des concentrations.

Echantillons	Concentration,	χ calculé,	χ mesuré,	traînage $\frac{\Delta\theta}{\theta}$
n° 1	$\frac{2}{104}$	654	612	$\frac{5}{1.000}$
n° 2	$\frac{4}{106}$	681	633	$\frac{11}{1.000}$
n° 3	$\frac{2}{104}$	634	570	$\frac{10}{1.000}$
n° 4	$\frac{2}{104}$	558	502	$\frac{10}{1.000}$

Les valeurs fournies par les mesures sont voisines des valeurs calculées et un peu inférieures : la différence s'explique par l'influence du champ démagnétisant des grains magnétiques dispersés sur leur aimantation induite.

Le traînage magnétique est appréciable pour tous les échantillons : dans le cas des échantillons de C. GUILLAUD, qui diffèrent par la grosseur des grains, la viscosité est plus marquée avec les grains très fins.

Magnétite Fe_3O_4 . On prépare généralement la magnétite, Fe_3O_4 , par réduction du sesquioxyde rhomboédrique, $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$. Elle cristallise dans le système cubique suivant le type spinelle.

La magnétite est très répandue dans la nature, on la trouve dans un grand nombre de roches, souvent associée à d'autres minéraux. Sa densité, D , est voisine de 5, ce qui la classe parmi les minéraux "lourds".

La susceptibilité de la magnétite est très élevée : les courbes de P. WEISS (54) indiquent une susceptibilité massique vraie voisine de 2 u.e.m. dans des champs de l'ordre de 10 oersted ; J. L. SNOEK (48) a

trouvé pour une magnétite artificielle une perméabilité initiale, μ_0 , égale à 70, ce qui correspond à une susceptibilité massique, χ , de 1 u.e.m. environ.

Pour une susceptibilité aussi élevée le champ démagnétisant, qui dépend également de la forme de l'échantillon, peut avoir une influence considérable sur l'aimantation induite acquise par l'échantillon. En opérant sur des mélanges de magnétite artificielle et de kaolin J. ROQUET (44) a constaté que la susceptibilité globale, χ , d'un mélange contenant 1 % de magnétite artificielle est seulement de 775.10^{-6} u.e.m. ce qui s'explique par l'influence du champ démagnétisant propre à chaque grain de magnétite du mélange.

Même quand la magnétite se trouve en grains très fins, diamètre de l'ordre de 0,1 μ , J. ROQUET n'a jamais observé de trainage appréciable au cours de ses mesures, effectuées avec le magnétomètre de E. THELLIER.

Ferrites. Le sesquioxyde Fe_2O_3 se combine à des oxydes métalliques pour donner des ferrites de formule générale $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MO}$. On peut obtenir ces produits en précipitant par une base un mélange sel ferrique - sel du métal M , en proportions convenables, puis en soumettant le précipité à un recuit prolongé (7), (20), (21), (40).

Suivant la nature du métal M les ferrites sont ferromagnétiques (Mg, Ni, Cu, Ba, Sr, Pb) ou paramagnétiques (Ca, Cd, Sn, Zn). Le tableau ci-dessous indique les susceptibilités moyennes, χ , des ferrites dans un champ compris entre 0 et 100 oersted, déterminées par H. FORESTIER (21).

Ferrite	χ en 10^{-2} u.e.m.	Ferrite	χ en 10^{-2} u.e.m.
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CuO}$	102	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CdO}$	23,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{FeO}$	80	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{BaO}$	9,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NiO}$	78	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{SrO}$	8
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{MgO}$	54	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{PbO}$	1,2
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$	42,5	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{ZnO}$	0,16

Les ferrites alcalins, qui ne figurent pas dans ce tableau, s'hydrolysent en donnant soit du sesquioxyde cubique (ferrite de potassium) soit un hydrate de "Van Bemmelen" identique à la lépidocrocite (ferrite de sodium) (8) suivant les réactions :



L'hydrate $\gamma \text{FeO OH}$ se décompose vers 150° en donnant un oxyde cubique stabilisé (22)



Magnétites substituées. Il est possible de substituer au fer de la magnétite des ions métalliques monovalents (Na, K, Li), bivalents

(Co, Ni, Mg, Mn, Cu), trivalents (Al, Cr), tétravalents (Ti), soit en chauffant l'oxyde métallique correspondant avec la magnétite, soit en réduisant dans les conditions convenables un mélange oxyde métallique-sesquioxyde Fe_2O_3 , (3), (43).

Ces substitutions, dont les limites varient d'un métal à l'autre fournissent une gamme extrêmement étendue de produits ferrimagnétiques, différant considérablement par leur susceptibilité et leur point de Curie.

Ce résumé des propriétés des oxydes de fer permet de comprendre pourquoi les mesures magnétiques effectuées sur des oxydes préparés au laboratoire donnent souvent des résultats très variables d'un échantillon à l'autre. Les oxydes de fer peuvent subir entre eux des transformations mutuelles, ils se laissent combiner facilement à d'autres oxydes métalliques ou substituer par eux, et ces nouveaux produits sont susceptibles de donner des solutions solides avec les oxydes initiaux.

Signalons outre que les oxydes de fer tolèrent avec la composition stoechiométrique des écarts qui influencent leur comportement magnétique; celui-ci dépend encore de l'état de cristallisation et de la grosseur des grains.

Il en résulte que toutes les conditions de la préparation peuvent avoir une influence sur les caractères du produit obtenu.

Ainsi s'explique également la complexité des minéraux magnétiques des roches qui, au cours de leur formation, se sont trouvés placés dans des conditions permettant ces différentes combinaisons.

Parmi les combinaisons examinées ci-dessus, assez magnétiques pour permettre une interprétation des propriétés observées sur les sols, seuls la magnétite et le sesquioxyde cubique paraissent susceptibles de se former en quantité suffisante dans les conditions du milieu naturel. Les ferrites de magnésium et de calcium auxquels on pourrait songer, étant donnée l'abondance de ces éléments dans le sol, ne se forment qu'à température relativement élevée:

La réaction $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3\text{MgO}$ commence seulement vers 350° (21), et dans un mélange Fe_2O_3 , CaO, CaO reste libre jusqu'à une température de l'ordre de 800° (42).

Les magnétites substituées exigent également une température de plusieurs centaines de degrés pour leur préparation.

Ceci montre en outre que ces combinaisons sont stables à chaud tandis que le constituant magnétique de la fraction argileuse est détruit au cours de l'analyse thermique différentielle.

Le comportement du constituant magnétique de la fraction argileuse du sol est analogue à celui de l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé.

Bien que la magnétite, Fe_3O_4 , se rencontre dans un grand nombre de roches tandis que l'oxyde cubique, $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, n'est signalé que rarement et sous une forme hydratée, la lépidocrocite, $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$, relativement peu magnétique, le comportement de la fraction argileuse du sol s'apparente à celui de l'oxyde cubique. Le crochet exother-

mique sur les courbes d'analyse thermique différentielle, la disparition presque totale du constituant magnétique consécutive à cette analyse, le traînage observé au cours des mesures de susceptibilité correspondent aux propriétés de l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé. L'expérience montre qu'un tel oxyde peut être obtenu facilement à froid par précipitation simultanée d'un sel ferreux et d'un sel ferrique et que cette précipitation effectuée sur une terre peu magnétique lui confère des propriétés comparables à celles des argiles naturelles les plus magnétiques.

Préparation et propriétés des précipités Fe^{+++} , Fe^{++}

Pour obtenir ces précipités on mélange une solution de chlorure ferrique et une solution de sel de Mohr de concentrations connues, puis on ajoute une base. Le précipité, filtré et lavé est séché à l'étuve $100-105^\circ$.

Les propriétés magnétiques des produits ainsi préparés varient avec les proportions de Fe^{+++} et Fe^{++} , la concentration des solutions, la base utilisée et la température de la précipitation.

Lorsqu'on utilise comme base la soude, les précipités ont sensiblement les mêmes propriétés quel'on opère à froid ou à chaud, avec des solutions concentrées ou diluées; en faisant varier les proportions on constate que la susceptibilité du produit obtenu présente un maximum très étalé correspondant à des mélanges où les proportions de Fe^{+++} et Fe^{++} sont voisines.

Fe^{++} %	0	10	20	30	40	50
Susceptibilités en 10^{-6} u.e.m.	200	4.000	25.000	110.000	110.000	110.000
		60	70	80	90	100
	110.000	75.000	50.000	40.000	15.000	

Avec l'ammoniaque ce sont encore les mêmes proportions qui donnent les produits de susceptibilité maximum, mais la concentration des solutions et la température de la précipitation ont une influence plus grande: les précipités les plus magnétiques sont obtenus à froid avec des solutions concentrées.

Si, dans une solution mixte contenant 1 Fe^{+++} pour 1 Fe^{++} , on provoque la précipitation du fer par $\text{Ba}(\text{OH})_2$, CO_3Na_2 , $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$, ou CO_3HNNH_4 , on obtient également des produits magnétiques, mais ceux-ci présentent une susceptibilité beaucoup plus faible que celle des précipités préparés par l'ammoniaque ou la soude.

	NaOH	NH_4OH	CO_3Na_2	$\text{Ba}(\text{OH})_2$	$\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$	CO_3HNNH_4
χ	110.000	120.000	50.000	20.000	2.000	2000

Ces susceptibilités ont été déterminées avec l'appareil à induction.

Susceptibilité et traînage des mélanges sable-précipité. Quelques-uns de ces précipités ont été dilués avec du sable de manière à obtenir des mélanges dont les propriétés soient comparables à celles des sols. La susceptibilité et le traînage de ces mélanges ont été étudiés au magnétomètre :

Précipité 1 Fe^{+++} 1 Fe^{++} (par NH_4OH) concentration $\frac{1}{103}$

Susceptibilité du mélange $\chi = 1,270$, traînage $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{20}{1.000}$

Précipité 2 Fe^{+++} 1 Fe^{++} (par NH_4OH) concentration $\frac{1}{103}$

Susceptibilité du mélange $\chi = 1,180$, traînage $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{24}{1.000}$

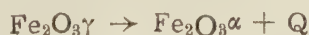
Précipité 2 Fe^{+++} 1 Fe^{++} (par NaOH) concentration $\frac{1}{103}$

Susceptibilité du mélange $\chi = 970$, traînage $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{18}{1.000}$

Ces résultats montrent que la susceptibilité des précipités Fe^{+++} , Fe^{++} est très élevée, en particulier lorsqu'ils sont préparés avec la soude ou l'ammoniaque, et comparable à celle de la magnétite ou du sesquioxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$. En outre ils présentent un traînage important, comme les argiles du sol.

Les précipités Fe^{+++} , Fe^{++} sont constitués essentiellement par l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$. Aux rayons X les précipités très magnétiques donnent un diagramme (fig. 8) qui présente les raies principales de la magnétite ou celles de l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, très voisines (30). La largeur des raies, indiquant que le produit est formé de cristaux très fins, ne permet pas d'identifier l'oxyde d'après le diagramme. Mais l'analyse chimique a montré que ces précipités ne contiennent qu'une proportion très faible de FeO (2,4 % pour le précipité 1 Fe^{+++} 1 Fe^{++} par NH_4); on déduit que les précipités très magnétiques sont constitués essentiellement par l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

Ce résultat est confirmé par l'analyse thermique différentielle; on observe sur la courbe (fig. 5) un crochet exothermique très prononcé, correspondant à la transformation :



qui se fait entre 500° et 600° .

Le produit obtenu à partir du chlorure ferrique seul donne un diagramme X dont les raies sont celles de la goethite (fig. 9), tandis que le produit obtenu à partir du sel de Mohr donne un diagramme X présentant les raies de la goethite et celles de l'oxyde cubique (fig. 10).

Stabilité des précipités Fe^{+++} Fe^{++} en présence d'eau. A la température ordinaire ces précipités conservent leurs propriétés magnétiques : je n'ai pas constaté de variation en répétant les mesures de susceptibilité à plusieurs mois d'intervalle.

Ils supportent des alternatives humectation-dessication à 100° (fig. 6) mais leur susceptibilité diminue progressivement lorsqu'ils sont maintenus en présence d'eau dans une étuve 100-105°.

	Précipitation par NaOH	Précipitation par NH ₄ OH
Témoins	$\chi = 110.000$	$\chi = 125.000$
Séjour : 1 semaine	$\chi = 75.000$	$\chi = 80.000$
Séjour : 2 semaines	$\chi = 50.000$	$\chi = 47.000$

Simultanément le crochet exothermique s'atténue sur la courbe d'analyse thermique différentielle.

Comparaison entre l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ et les précipités Fe^{+++} Fe^{++} . La transformation $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3\alpha + Q$ se produit vers 300° avec l'oxyde cubique pur. Dans le cas des précipités Fe^{+++} Fe^{++} elle se produit à température plus élevée, entre 500° et 600° : l'oxyde cubique des précipités se comporte comme un oxyde cubique stabilisé.

La susceptibilité des précipités 1 Fe^{+++} , 1 Fe^{++} est nettement plus élevée que celle des oxydes γ de grande pureté préparés par C. GUILLAUD et A. MICHEL : si les précipités peuvent comporter un peu de magnétite puisque l'analyse chimique révèle une petite quantité de FeO (de l'ordre de 2 %), cette magnétite n'a qu'une faible responsabilité, par suite de sa dilution, dans la susceptibilité globale. La comparaison des courbes d'analyse thermique différentielle (fig. 5, 6, 7) confirme que la susceptibilité des produits précipités est due essentiellement à l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$: en effet, sur ces courbes relatives à un précipité témoin, à un précipité soumis à des alternatives humectation-dessication et à un précipité ayant séjourné à l'étuve 100°-105°, on voit que la destruction de l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, indiquée par la réduction du crochet exothermique, est accompagnée d'une diminution considérable de la susceptibilité.

L'état de cristallisation, la grosseur et la forme des grains, les écarts avec la composition stoechiométrique, les impuretés insérées dans la maille cristalline ont une influence sur le comportement magnétique des oxydes de fer ; c'est probablement à ces facteurs qu'il faut attribuer les différences observées entre les propriétés de l'oxyde γ à l'état pur et celles de l'oxyde γ des produits précipités.

Précipitation d'un mélange sel ferreux sel ferrique sur une terre peu magnétique. On mélange une terre peu magnétique (horizon B Etoile de Choisy-Versailles $\chi \approx 10$) avec une solution mixte de chlorure ferrique et de sel de Mohr, à raison de 1,5 g. de Fe^{+++} et Fe^{++} pour 100 g. de terre, puis on précipite les sels de fer par l'ammoniaque.

Au magnétomètre on constate que la terre ainsi traitée a une susceptibilité $\chi = 5.500$ et présente un traînage $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{27}{1.000}$, valeurs comparables à celles que l'on observe avec les argiles les plus magnétiques extraites des sols.

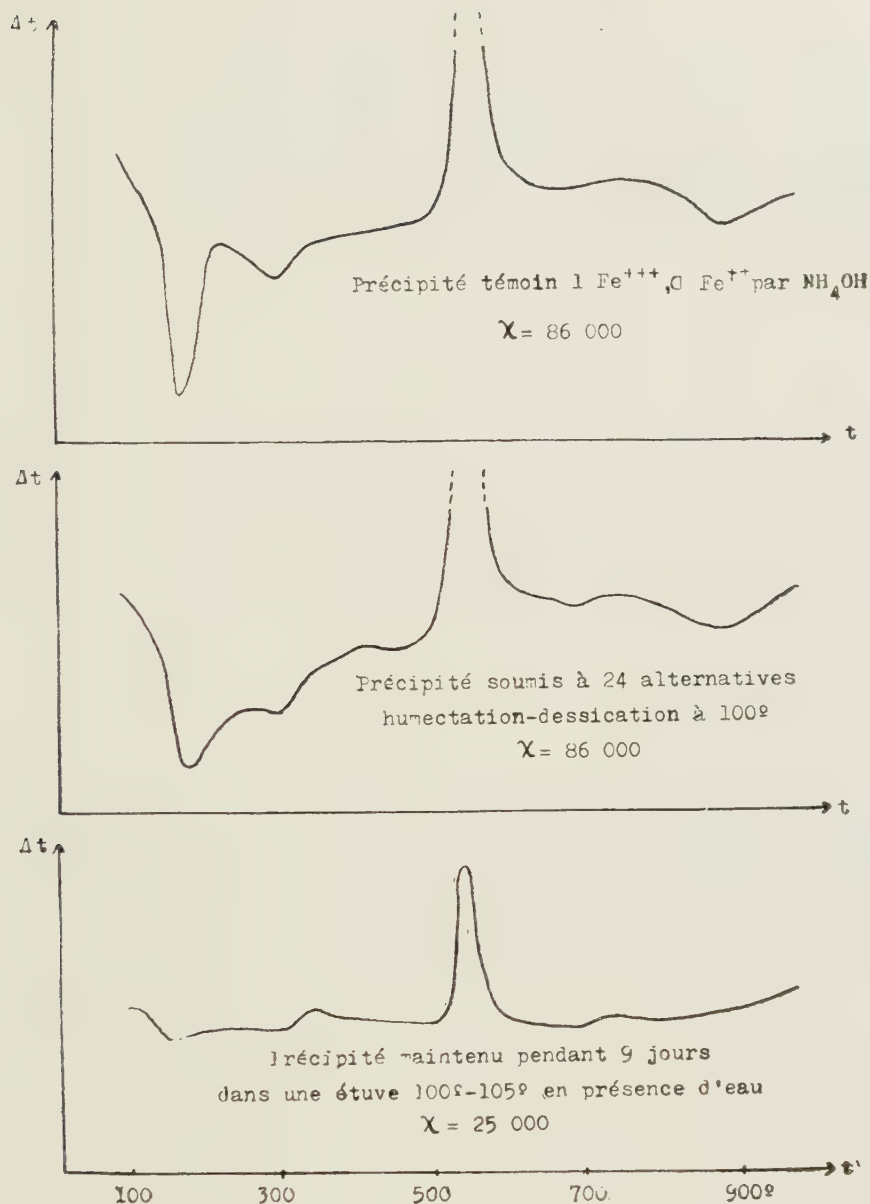


Fig. 5, 6 et 7.

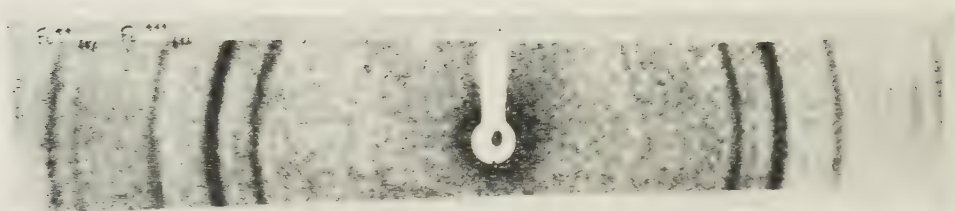


Fig. 8

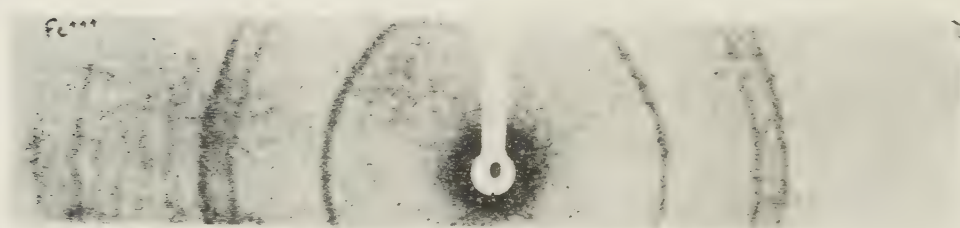


Fig. 9



Fig. 10
Diagrammes X.

Si l'on utilise le chlorure ferrique seul ou le sel de Mohr seul ce traitement ne communique pas à la terre une susceptibilité élevée :

terre + 3 % Fe^{+++} : $\chi \simeq 20$

terre + 3 % F^{++} : $\chi \simeq 40$

A partir de la susceptibilité observée sur un mélange sable précipité, $\chi = 1.270$ pour un mélange de concentration $\frac{1}{103}$, on peut calculer la susceptibilité d'un mélange correspondant à 3 g. de fer pour

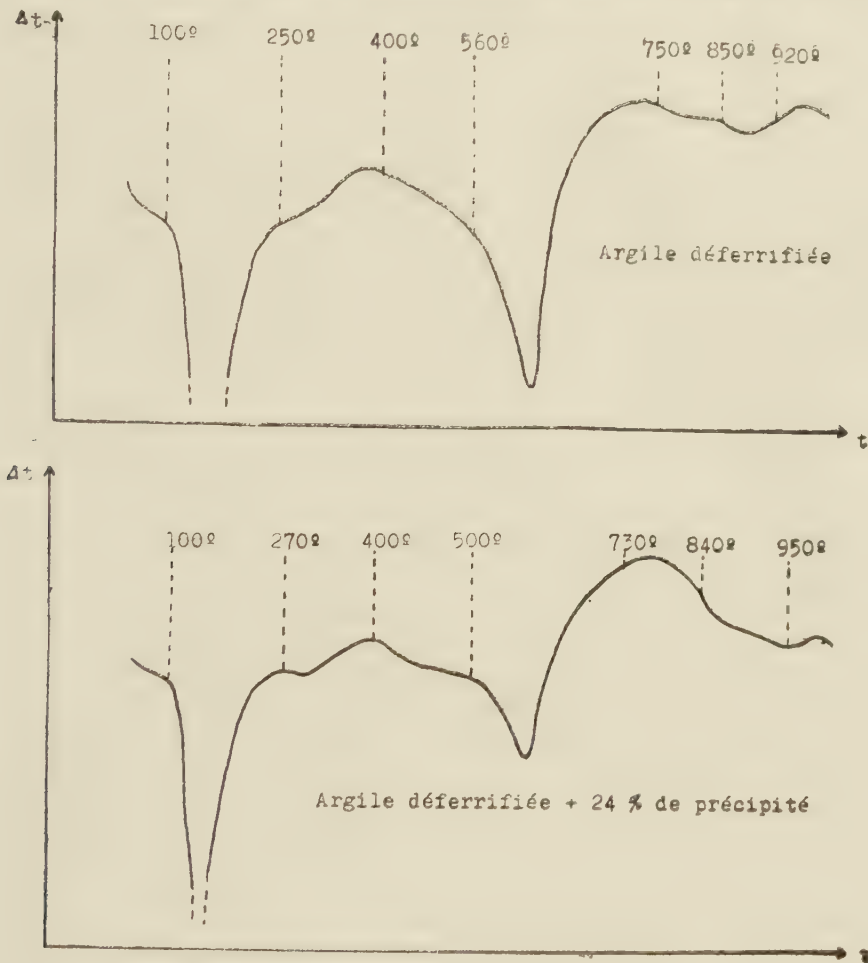


Fig. 11. et 11 bis. Analyse thermique différentielle.

100 g. de sable ; on trouve également une valeur voisine de 5.500 : la susceptibilité a la même valeur que la terre soit diluée avec un précipité préparé ou que la précipitation ait lieu en présence de la terre.

On a précipité également un mélange sel ferreux-sel ferrique sur la fraction argileuse d'un sol, après déferrification : un mélange argile déferrifié + 24 % de précipité Fe^{+++} , Fe^{++} présente une susceptibi-

lité $\chi \simeq 30.000$. En comparant les courbes d'analyse thermique différentielle (fig. 11) cette précipitation se traduit par un crochet exothermique aux environs de 700° .

Conclusion

Le comportement des argiles extraites de la couche superficielle du sol conduit à attribuer leur susceptibilité à la présence, en faibles quantités, d'une combinaison ferrugineuse qui se transforme vers 700° en un produit peu magnétique par une réaction exothermique. Lorsqu'on compare les propriétés de cette combinaison à celles des oxydes de fer, on constate qu'elles s'apparentent à celles de l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{H}_3\gamma$; en particulier elles présentent de grandes analogies avec les produits obtenus en précipitant simultanément un sel ferreux et un sel ferrique, produits qui sont constitués essentiellement par l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ (analyse chimique, diagramme X).

A la température ordinaire les précipités Fe^{+++} Fe^{++} conservent leurs propriétés magnétiques; à chaud ils subissent la transformation $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + Q$ entre 500° et 600° tandis que le sesquioxyde cubique pur se transforme vers 300° .

On doit également attribuer aux impuretés, qui augmentent la stabilité de l'oxyde cubique dans les précipités, un accroissement de la susceptibilité, nettement supérieure à celle de l'oxyde pur.

Il est possible que les impuretés contribuent aussi à augmenter la viscosité mais il est difficile de se prononcer à ce sujet; en effet si certaines substances, comme Fe_3O_4 , ne présentent pas de trainage appréciable quelle que soit la grosseur des grains, pour d'autres, dont $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, l'importance du trainage augmente quand la grosseur des grains diminue.

On est ainsi amené à considérer le constituant magnétique de la fraction argileuse du sol comme étant un produit du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé semblable à celui qui se trouve dans les précipités Fe^{+++} , Fe^{++} .

S'il n'est pas possible, dans l'un comme l'autre cas, d'exclure la présence d'une faible quantité de magnétite, celle-ci n'a qu'une influence très faible sur les propriétés de la fraction argileuse comme sur celles des précipités. Quant aux autres combinaisons du fer telles que les ferrites, les conditions de leur formation semblent incompatibles avec les conditions du milieu naturel et leur comportement à chaud ne correspond pas à celui de la fraction argileuse.

On ne peut pas déterminer la susceptibilité du constituant responsable de la susceptibilité de la fraction argileuse: les mesures portent sur des mélanges où il est intimement lié à des particules argileuses dont il est difficile de le séparer; en outre on ne connaît pas la structure de ces particules où l'oxyde de fer est associé à l'argile. La valeur calculée à partir de la concentration, en admettant que le fer contenu dans la fraction argileuse se trouve essentielle-

ment sous la forme Fe_3O_4 , fournit seulement un ordre de grandeur 100.000 à $200.000 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. pour le constituant magnétique de l'argile du sol de Pluméliau.

CHAPITRE IX

Constituants magnétiques de la fraction "sables" du sol.

Évolution de la susceptibilité des fragments de la roche-mère au cours de leur altération dans le sol.

L'examen minéralogique montre que des minéraux magnétiques provenant de la roche-mère, tels que la magnétite et l'ilménite, subsistent dans le sol (chapitre VI); au cours de l'analyse granulométrique ces minéraux sont recueillis principalement dans la fraction "sables", comme dans le cas des produits fournis par l'altération des roches sous l'influence de facteurs physico-chimiques (chapitre VII). Cependant les propriétés magnétiques de la fraction "sables" du sol ne peuvent pas être attribuées uniquement à des minéraux magnétiques présents dans la roche-mère: si la susceptibilité de la fraction "sables" est nettement inférieure à celle de la fraction "argiles" dans le cas d'un sol développé sur une formation peu magnétique, elle reste souvent importante dans des sols qui correspondent à des roches-mères pauvres en minéraux magnétiques; en outre les "sables" extraits du sol présentent généralement un trainage marqué qu'on n'observe pas sur les "sables" extraits des produits d'altération des roches riches en minéraux magnétiques.

Le Professeur BERTHOIS a noté que parmi les grains attirables à l'aimant, extraits du sol, certains sont recouverts d'un enduit ferrugineux magnétique tandis que des fragments de micaschistes sont devenus magnétiques, vraisemblablement à la suite de l'altération de la biotite dans le sol. Cette dernière remarque laisse supposer que l'évolution de la susceptibilité des roches peut être différente suivant que l'altération se produit à l'écart de la vie organique sous l'influence de facteurs physicochimiques, ou bien dans le sol où des facteurs biologiques viennent s'ajouter aux précédents.

Variation de la susceptibilité des roches au cours de leur altération dans le sol.

La susceptibilité des fragments de la roche-mère présents dans le sol est souvent supérieure à celle de la roche-mère compacte, dans le cas des roches peu magnétiques comme les schistes et les granites. C'est ainsi que les valeurs observées sur la "terre fine", les "graviers" et la roche compacte se présentent, en général, de la manière suivante:

Sol schisteux, Gléné, Saône-et-Loire

"Terre fine"	$\chi = 74$
Fragments de granite, séparés de la "terre fine"	$\chi = 28$
Roche-mère compacte, schiste	$\chi = 14$

Sol granitique, Sainte-Marine, Finistère

"Terre fine"	$\chi = 535$
Fragments de granite, séparés de la "terre fine"	$\chi = 25$
Roche-mère compacte, granite.	$\chi = 4$

Susceptibilité des fragments de différentes dimensions. A Pluméliau, Morbihan, un massif schisteux est recouvert d'un sol de faible épaisseur, 20 cm. environ, riche en matières organiques, de susceptibilité très élevée, $\chi = 1.860$. Les débris de la roche sous jacente sont très abondants dans ce sol : après avoir procédé à un fractionnement d'après la grosseur, j'ai déterminé la susceptibilité de chaque fraction.

Sol schisteux, Pluméliau, Morbihan

Fraction	dimensions	Susceptibilité
Argiles	$d < 0,002 \text{ mm.}$	$\chi = 8.450$
Limons	$0,002 \text{ mm} < d < 0,020 \text{ mm.}$	$\chi = 914$
Sables	$0,020 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm.}$	$\chi = 1.094$
Fragments de roche	$2 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm.}$	$\chi = 960$
» » »	$5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm.}$	$\chi = 439$
» » »	$10 \text{ mm} < d < 30 \text{ mm.}$	$\chi = 92$
» » »	$30 \text{ mm} < d < 50 \text{ mm.}$	$\chi = 96$
» » »	un seul fragment pesant 408 g.	$\chi = 54$
Roche-mère compacte, schiste		$\chi = 12$

La susceptibilité des fragments de roche extraits du sol est ici nettement supérieure à celle de la roche-mère pour toutes les fractions et elle est d'autant plus élevée que les dimensions des fragments sont plus petites : la fraction comprise entre 2 mm. et 5 mm. a des propriétés voisines de celles de la fraction "sables".

Pour enlever les enduits, ces fragments ont été décapés par l'acide chlorhydrique au 1/2 et les susceptibilités mesurées à nouveau :

Fragments	$d : 2 \text{ à } 5 \text{ mm., avant décapage}$	$\chi = 960, \text{ après } \chi = 362$
»	$d : 5 \text{ à } 10 \text{ mm., avant } \text{ »}$	$\chi = 439, \text{ après } \chi = 256$
»	$d : 10 \text{ à } 30 \text{ mm., avant } \text{ »}$	$\chi = 92, \text{ après } \chi = 69$

La diminution de susceptibilité consécutive à ce décapage énergétique correspond à la destruction de l'enduit ferrugineux magnétique, mais les débris de schiste conservent encore après ce traitement une susceptibilité beaucoup plus élevée que celle de la roche-mère compacte, ce qui indique que ces fragments ont subi dans le sol une

transformation profonde, d'autant plus importante que leurs dimensions sont plus petites.

Ainsi, au contact du sol, des roches peu magnétiques comme les schistes et les granites subissent des transformations au cours desquelles leur susceptibilité peut augmenter dans des proportions considérables. Cette modification des propriétés magnétiques des roches ne se produit que dans l'horizon humifère supérieur ; les débris de schiste ou de granite prélevés dans les couches profondes du sol ne se distinguent pas de la roche compacte sous-jacente.

Altération naturelle d'un granite dans une case lysimétrique. Au Laboratoire des Sols du C. N. R. A. à Versailles un granite, concassé en grains de 2 à 3 mm. de diamètre, est soumis à l'altération naturelle dans une case lysimétrique, depuis une trentaine d'années (16), (17). J'ai déterminé au magnétomètre la susceptibilité du granite initial et celle du produit d'altération, prélevé dans la couche superficielle entre 0 et 10 cm. :

Granite initial, échantillon témoin $\chi = 2$
Produit d'altération $\chi = 14$

Analyse granulométrique du produit d'altération

Fraction	Sables	Limons	Argiles
Proportions	92,8 %	4,3 %	1,8 %
Susceptibilités	10	17	18

La susceptibilité du produit d'altération est supérieure à celle du granite initial ; en outre les propriétés de ce produit se rapprochent de celles des sols : comme dans les sols la fraction "sables" est ici la moins magnétique, alors que pour le Gabbro et la latérite analysés mécaniquement les propriétés magnétiques appartiennent, presque exclusivement, à cette fraction.

Quelques herbes poussent accidentellement dans la couche superficielle et l'analyse chimique a décelé la présence de matières organiques dans les eaux de drainage de la case. On peut admettre que la variation de la susceptibilité du granite au cours de l'altération est provoquée ici par une transformation semblable à celle qui est à l'origine du développement des propriétés magnétiques dans les débris de schiste en contact avec le sol.

Cet exemple montre que l'altération naturelle d'une roche comme le granite peut être accompagnée d'un accroissement relativement rapide de la susceptibilité ; cependant le comportement du produit d'altération et la présence de matières organiques dans la case conduisent à penser que l'évolution de la susceptibilité a été influencée par des phénomènes biochimiques semblables à ceux qui se déroulent dans l'horizon humifère du sol.

Conclusion

Il résulte de cette étude que plusieurs types de constituants contribuent aux propriétés magnétiques de la fraction "sables" extraite de l'horizon humifère du sol :

1°) des minéraux magnétiques qui existaient dans la roche-mère et qui ont résisté à l'altération,

2°) des fragments de la roche-mère, initialement peu magnétiques, dont la susceptibilité a augmenté au contact du sol.

Les constituants du premier type se trouvent dans tous les horizons, leur proportion variant avec la nature de la roche-mère. Les constituants du second type sont localisés dans la couche superficielle riche en matières organiques ; leur importance, qui semble être assez indépendante de la nature minéralogique de la roche-mère, varie suivant les conditions qui règnent dans le sol.

Le décapage à l'acide chlorhydrique au $\frac{1}{2}$ montre que les fragments de roche présents dans le sol ont été recouverts d'un enduit ferrugineux magnétique soluble dans l'acide et qu'ils ont subi en outre une transformation profonde, accompagnée d'un accroissement de la susceptibilité.

La combinaison ferrugineuse magnétique qui recouvre les fragments de roches en contact avec le sol et celle qui se forme dans la masse de ces fragments se développent dans les mêmes conditions que la substance responsable de la susceptibilité de la fraction "argiles". Le phénomène du traînage tend également à rapprocher le comportement de la fraction "sables" du sol de celui de la fraction argileuse.

Il est probable que les propriétés de la fraction "sables" du sol sont dues, pour la plus grande part, à une combinaison du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé, comme celle qui confère ses propriétés à la fraction "argiles" ; les minéraux magnétiques provenant de la roche-mère n'ont qu'un rôle peu important, sauf lorsque le sol s'est développé sur une formation magnétique.

Dans l'analyse mécanique des sols les particules de dimensions supérieures à 2μ , "sables" et "limons", ont des propriétés analogues ; au point de vue magnétique les "limons" se rapprochent également des "sables" : on peut admettre que leurs constituants magnétiques sont les mêmes.

CHAPITRE X

Formation d'un produit magnétique dans le sol. Circonstances de formation

Les observations rapportées dans les chapitres précédents sur le comportement du constituant magnétique du sol ont conduit à admettre que les propriétés de l'horizon humifère sont dues essentiellement à une combinaison ferrugineuse du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé, en dehors de quelques cas particuliers où le sol s'est formé aux dépens d'une roche-mère riche en minéraux magnétiques.

On a vu également que ce composé magnétique n'apparaît pas dans les processus usuels d'altération des roches, il se développe seulement dans la couche superficielle du sol riche en matières organiques.

Susceptibilité du sol et concentration en matières organiques

La perte de poids observée au cours de l'analyse granulométrique doit correspondre aux matières organiques détruites par le traitement à l'eau oxygénée. On peut contrôler rapidement les indications fournies par l'analyse mécanique à ce point de vue en dosant le carbone organique par la méthode de P. Anne (2); cette méthode a été utilisée également pour des sols qui n'ont pas été soumis à l'analyse granulométrique.

Le dosage du carbone organique dans les différents horizons d'un profil montre que la variation de la susceptibilité suit la variation de la concentration en carbone.

Profil n° 3 Kerfourn (Morbihan)

Profondeur en cm :	0 — 20	20 — 50	50 — 80
Susceptibilités :	984	41	16
C pour 1.000 :	33	3	0,6

Si la présence de matières organiques est indispensable pour l'élaboration d'un produit magnétique, il n'y a pas de relation étroite entre la susceptibilité des différents sels et leur concentration en matières organiques. Le tableau suivant indique la teneur en carbone et la susceptibilité pour quelques échantillons de sols :

Sols	C pour 1.000	Susceptibilités
Gléné, Saône-et-Loire :	17	74
Kerabevin, Morbihan :	32	985
Pluméliau, Morbihan :	130	1.860
Maneguegan, Morbihan :	134	160

La matière organique totale correspondant au carbone dosé se trouve d'ailleurs dans le sol sous différentes formes; une fraction plus

ou moins importante est humifiée et douée de propriétés particulières. Les concentrations en carbone organique, déterminées par voie directe, concordent cependant assez bien avec les concentrations en matières organiques déduites des résultats de l'analyse mécanique comme on peut le constater sur une série d'échantillons prélevés à Coet-code:

Thalweg de Coet-code, Morbihan

No.	:	514	516	517	518
Situation	:	Haut de pente	Bas de pente	Haut de pente	Bas-fond très humide
Susceptibilités	:	864	652	156	114
C pour 1.000	:	28	30	25	61
Matières organiques (pour 1.000)	:	96	105	73	158

Dans cette série, le sol humide, qui présente la susceptibilité la plus faible, est le plus riche en matières organiques; la susceptibilité est encore relativement importante mais l'analyse mécanique a montré que ce sol humide a bénéficié d'un rapport de particules fines provenant des pentes voisines. L'analyse granulométrique indique des concentrations peu différentes en matières organiques pour les échantillons de sols secs et humides appartenant à la série de Kerfourn, alors que l'on observe des variations considérables de la susceptibilité:

Série de Kerfourn, Morbihan

		Bas-fond		
Situation	:	très humide	Bas de pente	Dans la pente
Susceptibilités	:	24	576	856
Matières organi- ques (pour 1.000)	:	68	88	82

Avec les échantillons de la série de Château-Gaillard, pour lesquels j'ai dosé le carbone organique, les susceptibilités se présentent dans l'ordre inverse des concentrations en carbone:

Série de Château-Gaillard, Pontivy

		Bas-fond	Bas de pente	
Situation	:	très humide	humide	Dans la pente
Susceptibilités	:	12	26	116
C pour 1.000	:	44	28	19

La présence de matières organiques apparaît ainsi comme une condition nécessaire à la formation du matériau magnétique dans le sol. L'humidité joue également un rôle important: une humidité excessive nuit au développement de ce matériau et favorise sa destruction.

Influence des fermentations des matières organiques sur l'évolution du fer dans le sol

La fermentation des matières organiques peut réduire et dissoudre des composés ferriques normalement peu solubles; S. HENIN et R. BETREMIEUX ont mis au point une méthode expérimentale qui permet d'accélérer l'évolution du fer dans le sol en activant les fermentations par l'addition d'une solution sucrée (29).

En appliquant cette méthode R. BETREMIEUX a pu interpréter l'évolution du fer dans le sol de la manière suivante (4):

En présence d'une humidité suffisante les fermentations des matières organiques créent un milieu réducteur où le fer prend une forme plus soluble, tandis que les résidus des fermentations assurent le transport.

Le déplacement du fer dans le sol comporte ainsi trois phases:

1°) Le fer des composés ferriques, notamment des oxydes, est d'abord réduit,

2°) Le fer réduit passe en solution à l'état d'ions complexes organiques électronégatifs permettant la migration du métal dans un milieu acide ou réducteur normalement défavorable à la migration du cation électropositif,

3°) Le fer ferreux en solution est oxydé puis précipité en hydroxyde ferrique:

a) Lorsque les substances protectrices sont quantitativement insuffisantes pour maintenir dissimulé le fer réoxydé,

b) Au fur et à mesure de la disparition biologique de ces substances.

Un abaissement du pH du milieu favorise la réduction et la dissolution du fer ferrique; une élévation de ce pH favorise l'oxydation du fer ferreux et sa précipitation.

En présence d'un drainage suffisant la dissolution se produira dans l'horizon humifère supérieur, tandis que la précipitation se fera dans les horizons inférieurs où le milieu cesse d'être réducteur. Cependant dans les régions soumises à une forte évaporation pendant de longues périodes de sécheresse la solution ferrugineuse peut remonter à la surface, entraînant la formation de croûtes superficielles d'oxyde de fer.

Dans les pays tropicaux ces phénomènes sont accélérés par une température élevée: l'accumulation du fer à certains niveaux se traduit par la formation de concrétions ou pisolithes, quelquefois d'une carapace.

Etude expérimentale de l'influence des fermentations sur la susceptibilité du sol

Des terres ont été traitées suivant la même méthode expérimentale en vue d'étudier l'influence des fermentations sur la susceptibilité. Plusieurs séries d'expériences ont été réalisées en faisant varier les concentrations des solutions sucrées utilisées pour activer les fermentations, et l'intensité du drainage.

I. — Traitement par percolation.

Le sol est placé dans des flacons (diamètre 6 cm, hauteur 20 cm.) dont on a enlevé le fond. Les flacons étant renversés, la terre, 300 g. environ, est maintenue par une toile fixée sur le goulot. Plusieurs échantillons d'un sol très magnétique ont été percolés chaque jour avec 20 cm³ de liquide, eau distillée ou solution de glucose additionnée d'un peu d'urée ou de sulfate d'ammonium pour subvenir aux besoins en azote des microorganismes.

Les susceptibilités ont été mesurées sur les échantillons séchés

après des périodes de traitement d'une durée voisine de trois mois. Une première série a donné les résultats suivants :

No.	:	7	8	9
Traitement	:	Eau distillée	Sol. glucose 5g./l	Sol. glucose 20 g./l
χ initial	:	1.778	1.788	1.788
χ après 1 ^{re} période	:	1.779	1.725	1.768
χ après 2 ^e période	:	1.771	1.717	1.620
χ après 3 ^e période	:			1.217

Au cours de ces expériences, effectuées sur la terre fine, il se produit souvent un colmatage et la terre devient imperméable: pendant la deuxième période les échantillons n° 7 et 8 laissaient difficilement passer le liquide après un mois de traitement.

Pour permettre un traitement prolongé, des échantillons de terre magnétique ont été dilués avec du sable siliceux de susceptibilité négligeable (terre 1/3 — sable 2/3.

Sol de Pluméliau (matières organiques 23 %) dilué avec du sable

No.	:	5	11	6
Traitement	:	Sol. glu. (7,5 g./l)	Sol. glu. (22,5 g./l)	Sol. glu. (67,5 g./l)
χ initial	:	581	581	581
χ après 1 ^{re} période	:	578	481	452
χ après 2 ^{re} période	:		322	

Malgré la dilution de la terre avec du sable un colmatage se produit encore et le rythme des arrosages n'a pas pu être maintenu. Le sol de Coet-code, moins riche en matières organiques, se laisse drainer plus facilement.

Sol de Coet-code (matières organiques 9 %) dilué avec du sable

No.	:	15	16	17
Traitement	:	Sol. glu. (7,5 g./l)	Sol. glu. (22,5 g./l)	Sol. glu. (67,5 g./l)
χ initial	:	180	180	180
χ après 1 ^{re} période	:	134	131	82

Lorsqu'on mesure la susceptibilité des différentes parties de la colonne de terre soumise au traitement on constate qu'elle a subi des modifications variables suivant la profondeur :

No.	Solution	initial	χ , partie supérieure	χ , partie inférieure
15	7,5 g/l	180	164	103
16	22,5 g/l	180	160	101
17	67,5 g/l	180	140	24
5	7,5 g/l	581	584	576
11	22,5 g/l	581	337	312
6	67,5 g/l	581	464	442

Au cours de ces expériences une fraction du fer contenu dans le sol est solubilisée et entraînée par le drainage qui s'effectue lib-

rement: d'abord un dépôt de couleur rouille se forme sur la toile qui retient la terre, puis on constate dans les filtrats la présence du fer en quantité notable, en partie à l'état ferreux, au bout d'une période variable avec l'échantillon traité et la concentration de la solution de glucose utilisée. Cette période est de l'ordre de trois semaines pour les échantillons n° 15, 16 et 17, elle est sensiblement plus longue pour les échantillons n° 5, 11 et 6 plus riches en matières organiques.

Le filtrat passe successivement par les couleurs jaune-paille, brun-clair, brun-foncé, brun-clair. La concentration du fer dans les filtrats est maximum pendant la période qui suit l'apparition de la teinte brun-foncé; il semble que le sol ne commence à perdre du fer en quantité importante qu'après une destruction partielle de la matière organique qu'il contient. Corrélativement la variation de la susceptibilité est plus rapide avec les échantillons n° 15, 16 et 17 qu'avec les échantillons n° 5, 6 et 11 dont la teneur en matières organiques est plus élevée.

En permettant la solubilisation et l'entraînement d'une fraction de la combinaison ferrugineuse responsable des propriétés magnétiques du sol, ces fermentations, accompagnées d'un drainage intense, provoquent une diminution très nette de la susceptibilité; cette diminution affecte surtout la partie inférieure des échantillons où le milieu est plus réducteur. Pour des traitements de même durée les effets observés dépendent de la concentration des solutions sucrées utilisées, les effets les plus marqués sont obtenus avec des solutions concentrées.

II — Alternatives humectation-dessication

Dans une deuxième série d'expériences j'ai cherché à activer les fermentations, sans provoquer l'entraînement du fer, en procédant à des arrosages assez espacés pour que l'eau ainsi ajoutée disparaisse entièrement par évaporation. Des échantillons de terre, placés dans des flacons comme dans les expériences précédentes, ont reçu tous les dix jours 30 cm³ de solution sucrée pendant une période de trois mois.

Quelle que soit la concentration de la solution sucrée utilisée, je n'ai pas observé de variation appréciable de la susceptibilité pour les sols traités de cette façon, qu'il s'agisse de terres très magnétiques, bien que le fer ait subi des remaniements apparents: formation d'une croûte de couleur rouille à la surface de certains échantillons, formation de traînées de même couleur au contact du verre et de la terre, apparition de tâches noires dans la masse, taches qui disparaissent quand la terre est séchée à l'air.

Je me propose de reprendre cette série d'expériences en modifiant le dispositif: au moment du dépôtage j'ai remarqué que les échantillons étaient encore très humides dans la masse bien qu'ils n'aient pas été arrosés depuis dix jours. Il est probable que ces échantillons sont restés constamment très humides, en dehors de la partie superficielle et de quelques zones voisines des parois où la circulation de l'air demeurerait possible. Il faudrait se placer dans des conditions plus favorables à la dessication en utilisant, par exemple, des vases moins profonds et de section plus grande.

III — Expériences de fermentation activée sur des sols en place.

Ces expériences ont été réalisées au C.N.R.A. à Versailles (5): le sol est placé dans un cylindre en aluminium (diamètre 14 cm, hauteur 16 cm.), puis le cylindre est enfoncé en terre de 10 cm. à l'endroit où le sol a été prélevé, de manière que la couche superficielle se trouve au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre.

Les essais portent sur 2 kg. de terre environ; chaque échantillon a reçu pendant 14 semaines, tous les 2 jours, 200 cm³ de solution sucrée de concentration variable.

Sauf pour l'essai témoin T₂, la susceptibilité a été mesurée, après traitement, sur un échantillon prélevé dans la moitié supérieure et sur un échantillon prélevé dans la moitié inférieure;

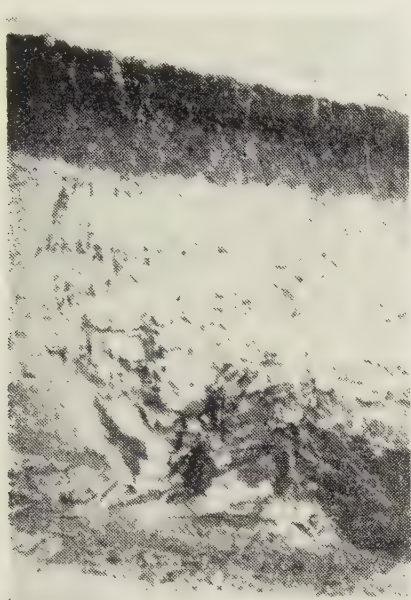
Essai témoin T ₂	solution : urée 0,5 g/l	
Avant traitement : $\chi = 25$	Après traitement : $\chi = 30$	
Essai G ₃	solution : glucose 2,5 g/l : urée 0,5 g/l	
Avant traitement : $\chi = 28$	Après traitement :	Haut $\chi = 30$ Bas $\chi = 35$
Essai G ₅	solution : glucose 7,5 g/l : SO ₄ (MH ₄) ₂ 1g/l	
Avant traitement : $\chi = 29$	Après traitement :	Haut $\chi = 25$ Bas $\chi = 39$
Essai G ₆	solution : glucose 22,5 g/l, SO ₄ (MH ₄) ₂ 1g/l	
Avant traitement : $\chi = 27$	Après traitement :	Haut $\chi = 57$ Bas $\chi = 31$
Essai G ₇	solution : glucose 67,5 g/l, SO ₄ (NH ₄) ₂ 1g/l	
Avant traitement : $\chi = 29$	Après traitement :	Haut $\chi = 24$ Bas $\chi = 20$

Etant données les masses des échantillons soumises à la mesure, les susceptibilités indiquées ont été déterminées avec une incertitude inférieure à 3. 10⁻⁶ u.e.m.

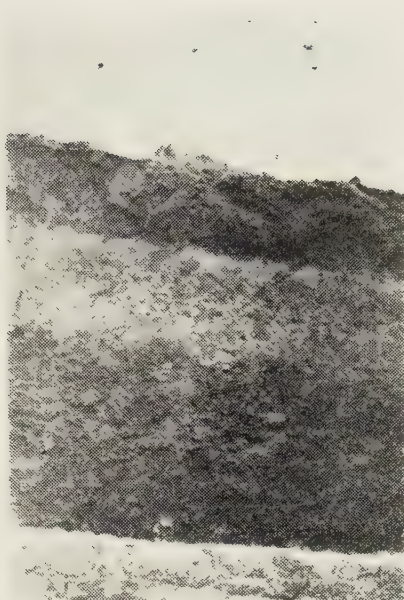
Le fer total et le fer facilement soluble ont été dosés par R. BETREMIEUX sur le témoin T₂ et sur les essais G₅, G₆, et G₇:

	Fer total ‰	Fer facilement soluble ‰	χ
Témoin :	0,790	0,127	25
Essai G ₅ Haut :	0,750	0,179	25
Bas :	0,786	0,142	39
Essai G ₆ Haut :	0,780	0,143	57
Bas :	0,781	0,152	31
Essai G ₇ Haut :	0,535	0,116	24
Bas :	0,750	0,310	20

L'essai G₇ se distingue des essais G₃, G₅ et G₆ au point de vue des variations de la susceptibilité: tandis qu'on observe une faible diminution de celle-ci avec l'essai G₇, la fermentation s'est traduite par une légère augmentation avec les autres essais, les échantillons G₆ Haut et G₅ Bas présentant une variation très nette.



Profil no. 5 — Sol sur granite



Profil no. 18 — Sol sur schiste



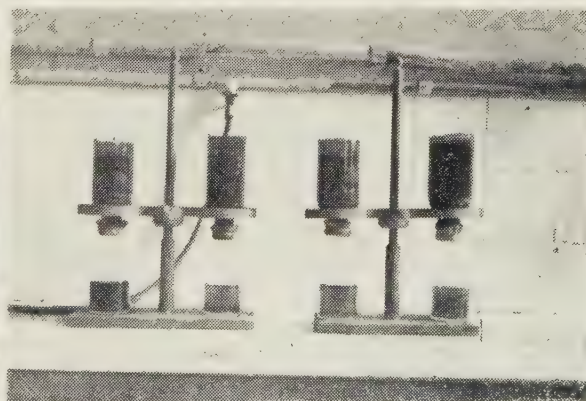
Profil no. 12 — Sol peu épais sur granite



Pluméliau, Sol peu épais sur schiste



Profil no. 16 — Sol granitique enterré
sous du sable de dune



Expériences des fermentation activée
— traitement par percolation —

Cette différence de comportement se retrouve dans les dosages de fer total: seul l'échantillon G₇ a perdu du fer en quantité notable.

Le remaniement du fer se manifeste par une augmentation sensible de la concentration en fer facilement soluble, mais la variation de la susceptibilité n'est pas liée étroitement à cette solubilisation du fer: dans la moitié inférieure de l'essai G₇ on enregistre simultanément un accroissement considérable de la proportion de fer facilement soluble et une diminution de la susceptibilité.

Ainsi la fermentation activée a provoqué, sur des sols en place, une augmentation appréciable de la susceptibilité dans quelques cas et une légère diminution lorsque la fermentation a été accompagnée d'un entraînement notable du fer.

Cette étude expérimentale montre que la fermentation de matières organiques comme le glucose peut provoquer, dans des délais relativement courts, des modifications sensibles dans les propriétés magnétiques du sol, le sens de ces modifications dépendant des conditions dans lesquelles se déroule la fermentation.

Les résultats observés sur les sols traités sur place par des solutions sucrées semblent montrer que si la fermentation est assez active, sans toutefois entraîner une migration du fer, elle se traduit par une augmentation de la susceptibilité.

Au contraire, et ici les résultats sont très nets, lorsque la fermentation est accompagnée d'un déplacement notable du fer, comme dans le traitement par percolation, la susceptibilité diminue dans des proportions importantes.

Des fermentations, activées ici par des rapports de glucose, se produisent également dans le milieu naturel, à un rythme plus lent, aux dépens des matières organiques du sol. Les conclusions tirées de l'étude expérimentale, réalisée dans des conditions qui ne s'éloignent pas trop de celles que l'on trouve dans la nature, sont valables pour les sols en place et permettent d'interpréter les observations antérieures.

1°) La substance ferrugineuse responsable des propriétés magnétiques de l'horizon humifère supérieur du sol est due probablement à un remaniement du fer sous l'influence du milieu réducteur créé par la fermentation des matières organiques. Cette explication doit être confirmée par une étude expérimentale au laboratoire où le sol sera soumis à des alternatives humectation-dessiccation et par des expériences analogues à celles qui ont été réalisées au Laboratoire des Sols du C. N. R. A.

2°) Cette substance ferrugineuse ne peut pas se développer dans les sol très humides où les fermentations se déroulent dans des conditions favorables à la solubilisation et à la migration du fer. La formation de "gley", que les pédologues observent dans certains horizons des sols humides, constitue une manifestation de ce déplacement du fer.

Mécanisme de la formation d'une substance magnétique dans le sol.

On vient de voir que la formation d'une substance magnétique dans le sol est liée à la fermentation des matières organiques; j'ai établi, d'autre part, que cette substance est une combinaison ferrugineuse dont le comportement est analogue à celui de l'oxyde cubique $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé.

Une combinaison semblable se produit lorsqu'on précipite simultanément un sel ferreux et un sel ferrique. Il est possible que, dans certaines conditions, une combinaison du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ se produise dans le milieu naturel par le même processus de co-précipitation (47), mais il est difficile d'admettre que dans l'horizon humifère du sol la substance magnétique se forme suivant ce mécanisme:

1°) Le fer en solution dans le sol se trouve le plus souvent sous forme d'ions complexes organiques électronégatifs (4), (38) et sa précipitation, à partir de ces complexes, ne semble pas donner naissance à un composé magnétique; en particulier, dans les expériences de percolation, on n'obtient pas de produits magnétiques en précipitant le fer entraîné dans les filtrats.

2°) Dans l'hypothèse d'une formation par co-précipitation des ions Fe^{+++} et Fe^{++} l'élaboration de la combinaison magnétique ne devrait pas être limitée à la couche superficielle humifère.

L'expérience montre qu'on peut également obtenir une substance magnétique par réduction à froid du sesquioxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$: si l'on traite cet oxyde fraîchement précipité par des réducteurs comme l'hydrogène naissant en milieu sodique, le sulfure de sodium, l'hydrosulfite de sodium, on constate la présence dans le produit obtenu de grains attirables à l'aimant et un accroissement notable de la susceptibilité.

Susceptibilité des produits obtenus par réduction des précipités de Fe_2O_3

Susceptibilité des précipités initiaux: $\chi = 200 \cdot 10^{-6}$ u. e. m.

Traitement	Susceptibilité des produits de la réduction
H naissant ($\text{Al} + \text{NaOH}$)	$\chi = 1.400$
Hydrosulfite de sodium	$\chi = 7.000$
Sulfure de sodium	$\chi = 400$

Ces susceptibilités ont été déterminées avec l'appareil à induction. Le produit obtenu par la réduction au moyen de l'hydrosulfite a été étudié au magnétomètre; il présente un trainage très net, $\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{7}{1.000}$: la substance magnétique présente dans les précipités ainsi traités est probablement du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

Il est permis de penser que la formation dans le sol d'une combinaison du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ se fait suivant un mécanisme semblable:

réduction des composés ferriques, en particulier de l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$, dans l'horizon humifère, suivie d'une réoxydation sur place qui donne naissance à l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$; cette interprétation est en accord avec les observations faites sur les sols en place comme sur les sols traités par une solution sucrée.

Conclusion

La susceptibilité magnétique du sol, qui, en général, ne prend de l'importance que dans l'horizon humifère supérieur, peut être modifiée par la fermentation de matières organiques comme le glucose: elle subit une diminution lorsque la fermentation crée un milieu très réducteur permettant la solubilisation et la migration du fer; on a observé au contraire une augmentation de susceptibilité dans quelques cas où la fermentation provoque un remaniement du fer sans entraînement notable.

La formation d'une combinaison magnétique dans le sol est due vraisemblablement à une réduction des composés ferriques suivie d'une réoxydation sur place, la réduction étant rendue possible par la fermentation des matières organiques; ces phénomènes d'oxydo-réduction ont pour résultat la transformation du sesquioxyde peu magnétique en sesquioxyle cubique.

Les conditions d'oxydo-réduction dans l'horizon humifère varient avec l'activité des fermentations des matières organiques et l'humidité du milieu. En présence d'une humidité suffisante des fermentations actives, une aération du sol médiocre, favorisent les phénomènes de réduction; en présence d'une humidité plus faible des fermentations ralenties, une circulation de l'air plus facile, permettent la réoxydation des produits de la réduction et le développement de l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

Lorsque le sol reste très humide pendant une longue période la réduction des combinaisons ferriques donne du fer ferreux dont la solubilisation est facilitée par les résidus de fermentation des matières organiques. Le fer peut alors migrer: généralement il est entraîné vers les horizons inférieurs par les eaux de drainage, parfois une évaporation intense le ramène vers la surface. Dans les deux cas la réoxydation suivie d'une précipitation donne un sesquioxyle peu magnétique: l'accumulation du fer entraîné dans certains horizons inférieurs ne leur confère pas une susceptibilité importante; de même les croûtes qui se sont formées à la surface des échantillons au cours des expériences humectation-dessication ne présentaient qu'une très faible susceptibilité.

Dans les sols humides le fer a tendance à migrer mais il n'est pas certain que le déplacement du fer soit nécessaire pour que ces sols présentent une faible susceptibilité: dans un milieu constamment très humide les conditions seront toujours réductrices tandis que la

formation d'une substance magnétique semble exiger des périodes alternées de réduction et d'oxydation.

Si le milieu reste réducteur pendant une longue période, il est possible également que la réduction des composés ferriques, sans provoquer le déplacement du fer, donne naissance à du fer ferreux sous une forme telle que sa réoxydation ultérieure n'engendre pas un produit magnétique : dans les essais G_5 , G_6 et G_7 la proportion du fer remanié ne correspond pas aux variations de la susceptibilité, en particulier dans la partie inférieure de G_7 où la susceptibilité a diminué tandis que le fer a subi un remaniement important. Le rôle complexant des matières organiques vis à vis du fer ferreux s'oppose en effet à la formation d'un composé magnétique : le produit obtenu par la précipitation du fer, ferreux et ferrique, présent dans les filtres des expériences de percolation est peu magnétique, comme les couches où le fer entraîné dans le sol s'est accumulé.

En résumé, les résultats observés au cours de cette étude permettent d'interpréter les propriétés magnétiques des sols formés sur des roches-mères peu magnétiques par la fermentation des matières organiques. Suivant les conditions d'humidité du milieu naturel, cette fermentation peut avoir les effets suivants :

1°) le régime de l'humidité place le sel dans des conditions qui sont alternativement réductrices et oxydantes ; l'oxydation sur place du fer ferreux résultant de la réduction produit une combinaison du type $Fe_2O_3\gamma$: le sol présente alors une susceptibilité importante dans l'horizon humifère ;

2°) en présence d'une humidité suffisante le milieu demeure réducteur pendant de longues périodes, les résidus de la fermentation peuvent former des complexes avec le fer ferreux ; une oxydation ultérieure du fer ferreux à partir de ces complexes ne donne pas un produit magnétique : la susceptibilité est faible, que le fer complexé reste sur place ou qu'il soit entraîné ; dans ce dernier cas les zones d'accumulation du fer précipité sont également peu magnétiques.

CHAPITRE XI

Influence des propriétés magnétiques du sol sur les éléments du champ magnétique terrestre

Lorsque le sol s'est développé sur une roche-mère peu magnétique seule la couche superficielle, d'une épaisseur de l'ordre de 30 cm., présente une susceptibilité importante. Cette couche, qui correspond sensiblement à la partie labourée dans les terrains cultivés, est partout remuée par les racines, les vers, les larves, etc..., et son aimantation permanente est nécessairement négligeable ; elle ne peut avoir

une influence sur les éléments du champ magnétique terrestre que par son aimantation induite.

On peut considérer, en première approximation, l'horizon humifère magnétique comme un milieu homogène et isotrope entouré de milieux non magnétiques et limité par deux faces planes parallèles.

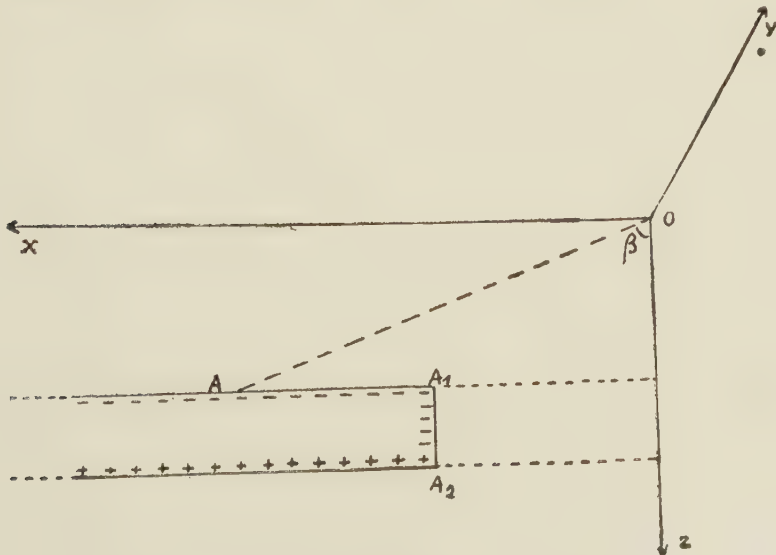
Dans un champ magnétique $\vec{H}$ cette couche acquiert une aimantation induite $\vec{J} = k \cdot \vec{H}$, la susceptibilité k , $k = \chi \cdot D$, étant de l'ordre de 10^{-3} u.e.m., c'est à dire assez faible pour que le champ démagnétisant soit négligeable.

Pour évaluer l'ordre de grandeur des anomalies que la couche superficielle du sol peut provoquer, je me placerai dans le cas d'une couche plane horizontale. Une telle couche se comporte comme une plaque et le champ qu'elle crée en un point se détermine par un calcul classique, en attribuant à chaque unité de surface une charge $\sigma = J_n$; J_n est la composante de J suivant la normale à la surface.

Avec une plaque plane indéfinie le champ, $2\pi\sigma$, créé en un point par l'une des faces est égal et opposé au champ créé par l'autre face; pratiquement l'influence d'une couche plane de grandes dimensions, aimantée uniformément, ne se fait sentir qu'au voisinage des bords.

Anomalie provoquée par une couche superficielle plane et horizontale limitée par un plan vertical, perpendiculaire au méridien magnétique

Soit un point O situé au voisinage du bord sud d'une couche plane, horizontale, d'épaisseur e . Soit Ox , Oy , Oz trois axes rectangulaires: la verticale Oz est orientée vers le bas, l'horizontale Ox vers le nord magnétique, l'horizontale Oy vers l'est (graphique 2).



Graphique 2

Si l'on désigne par H_x et H_z les composantes horizontale et verticale du champ terrestre H , le champ créé au point O par l'ensemble de la couche provient des trois distributions superficielles : $-\sigma = -kH_z$ sur la face supérieure ; $+\sigma = kH_z$ sur la face inférieure ; $\sigma' = -kH_x$ sur le bord vertical sud.

Une bande horizontale parallèle au bord, de largeur dx , de densité σ , passant par A , crée en O un champ dirigé suivant OA et d'intensité $2\sigma \frac{dx}{OA}$, ayant pour composantes :

$$\text{suivant } Ox \quad 2\sigma \frac{dx}{OA} \sin \beta \text{ et suivant } Oz \quad 2\sigma \frac{dx}{OA} \cos \beta$$

Le champ produit en O par l'ensemble des faces supérieure et inférieure aura pour composante verticale $h_z = 2\sigma(\beta_2 - \beta_1)$, où $\beta_2 = \widehat{zOA_2}$, $\beta_1 = \widehat{zOA_1}$, et $\sigma = kH_z$,

$$\text{pour composante horizontale } h_x = \sigma \operatorname{Log} \frac{x_1^2 + z_2^2}{x_1^2 + z_1^2}$$

(la composante verticale étant comptée positivement vers le bas et la composante horizontale positivement vers le nord)

Les charges σ' réparties sur le bord vertical A_1A_2 créent en O un champ h ,

$$\text{de composante verticale } h'_z = -\sigma' \operatorname{Log} \frac{x_1^2 + z_2^2}{x_1^2 + z_1^2}$$

$$\text{et de composante horizontale } h'_x = 2\sigma'(\beta_1 - \beta_2)$$

(σ' , négatif pour le bord sud, serait positif pour un bord nord)

En faisant les sommes $h_z + h'_z$ et $h_x + h'_x$ on peut calculer les anomalies verticale et horizontale provoquées au point O par une couche dont les bords A_1 et A_2 ont pour coordonnées par rapport au point O : x_1 , z_1 et x_2 , z_2 .

Application numérique.

Cas d'une couche horizontale limitée par un plan vertical orienté Est-Ouest, d'épaisseur, $e = 30$ cm. de susceptibilité massique $\chi = 1.000 \cdot 10^{-6}$ u. e. m.

Pour simplifier les calculs, je prendrai la densité D égale à 2, d'où $k = \chi \cdot D = 2 \cdot 10^{-3}$ u. e. m.

Si l'on prend $H_z \simeq 0,4$ oersted, $H_x \simeq 0,2$ oersted, on a :

$$\sigma = J_z = k \cdot H_z = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ u.e.m.}$$

$$\sigma' = J_x = k \cdot H_x = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ u.e.m.}$$

Les appareils de mesure étant posés sur un trépied se trouvent généralement à une hauteur d'environ 1 m. au dessus du sol ; j'ai adopté dans ces calculs : $z_1 = 100$ cm, $z_2 = z_1 + e = 130$ cm.

Les graphiques des fig. 12 et 13 indiquent, dans ces conditions, les perturbations des composantes verticale et horizontale du champ terrestre au voisinage du bord de la couche. Les anomalies, qui peu-

vent atteindre une trentaine de gammes (1 gamma $\equiv 10^5$ oersted) pour la composante verticale, une quarantaine de gammes pour la composante horizontale, diminuent rapidement lorsqu'on s'écarte du bord.

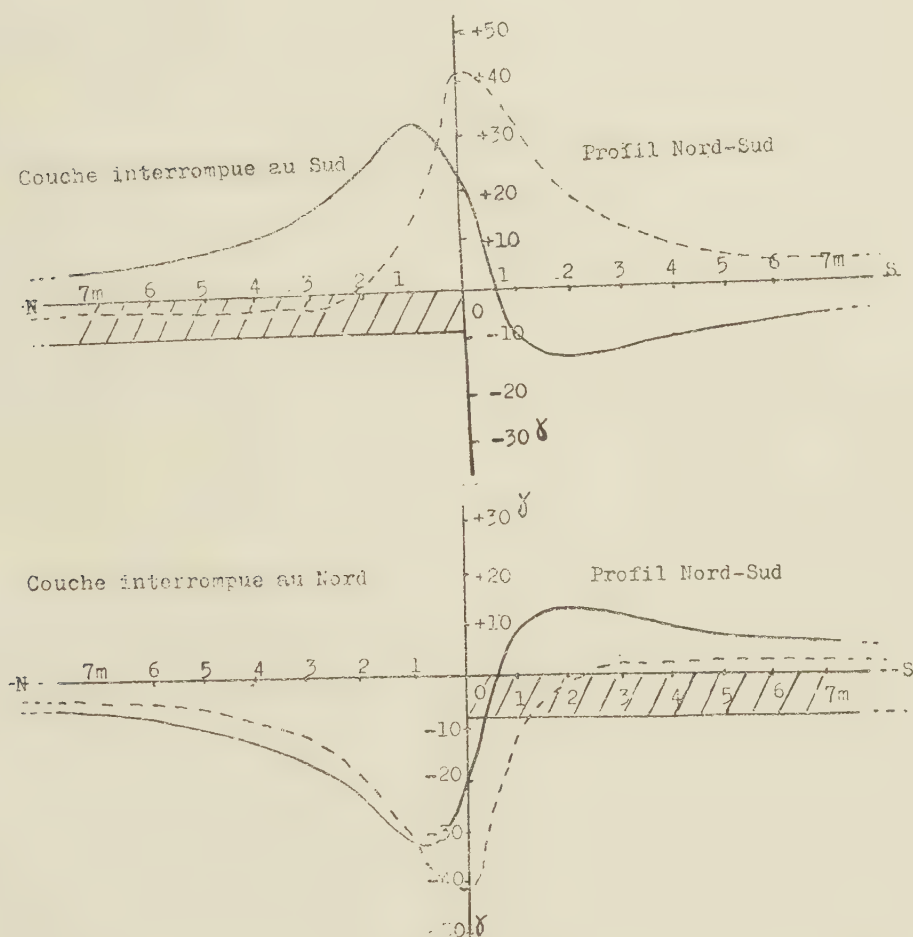


Fig. 12 et 13

Anomalies des composantes du champ terrestre lorsque la couche magnétique superficielle est limitée par un plan vertical E.W.

$$(e = 30 \text{ cm}, z_1 = 1 \text{ m.}, k = 2 \cdot 10^{-3} \text{ u.e.m})$$

en trait plein, les anomalies de la composante verticale, en traits interrompus, les anomalies de la composante horizontale.

Conclusion

J'ai supposé dans l'application numérique ci-dessus que la susceptibilité massique, χ , de la couche superficielle du sol était égale à $1.000 \cdot 10^{-6}$ u.e.m. Une susceptibilité aussi élevée n'est pas fréquente dans l'horizon humifère supérieur, mais on rencontre assez sou-

vent des susceptibilités de l'ordre de $500 \cdot 10^{-6}$; la valeur maximum de l'anomalie est alors d'une quinzaine de gammas pour la composante verticale et d'une vingtaine de gammas pour la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Une interruption brusque de l'horizon humifère du sol peut donc provoquer, sur quelques mètres, des perturbations appréciables, la sensibilité des appareils de mesure permettant de déterminer les composantes du champ terrestre à quelques gammas près.

Seules ont été évaluées les anomalies créées au voisinage des bords d'une tranchée large, à parois verticales; d'autres cas peuvent se présenter: fosses comblées par de la terre végétale, talus, etc..

Il est généralement possible d'évaluer grossièrement la susceptibilité du sol, sur le terrain, en approchant une petite motte de terre de l'appareil de mesure; on en déduira les précautions à prendre pour éviter, éventuellement, les effets d'une discontinuité dans l'horizon humifère sur le champ terrestre: ces discontinuités sont susceptibles d'apporter des modifications notables au tracé des courbes isanomales lorsqu'on cherche à dresser la carte des anomalies magnétiques dans une région faiblement perturbée.

Résumé et Conclusions

Ayant remarqué que la couche superficielle du sol est souvent plus magnétique que la roche sous-jacente, je me suis proposé d'étudier la susceptibilité magnétique des sols et d'en rechercher l'origine.

Après avoir rappelé brièvement dans un premier chapitre comment l'évolution d'une roche-mère conduit à la formation d'un sol, j'ai signalé les résultats obtenus par différents auteurs dans l'étude de l'aimantation induite des roches et des minéraux (chap. II).

Pour les déterminations de susceptibilité (chap. III) j'ai utilisé les appareils construits par E. THELLIER à l'Institut de Physique du Globe de Paris. Le plus souvent les mesures ont été effectuées avec l'appareil à induction: cette méthode est commode et rapide, et la précision, de l'ordre de 3 % lorsque l'on opère sur des masses de terre voisines de 200 g., est largement suffisante, étant donné l'hétérogénéité des sols et les limites très étendues entre lesquelles varie leur susceptibilité (de 10^{-5} à $2 \cdot 10^{-3}$ u.e.m.). Avec le magnétomètre astatique symétrique la préparation des échantillons demande plus de temps mais la précision est meilleure, surtout lorsque l'on ne dispose que de quantités réduites d'échantillons peu magnétiques; la méthode magnétométrique se prête en outre à l'étude du traînage. Dans les déterminations de susceptibilité auxquelles j'ai procédé, l'aimantation induite était toujours provoquée par un champ faible, de l'ordre de 10 oersteds, et à la température ordinaire.

Si l'on mesure la susceptibilité des différentes couches du sol

(chap. IV), on constate que la couche superficielle est, en général, beaucoup plus magnétique que les couches sous-jacentes: dans l'horizon humifère supérieur la susceptibilité est souvent élevée et atteint parfois des valeurs de l'ordre de 10^{-3} u.e.m., comparables à celles que présentent les roches considérées comme magnétiques. En dehors de quelques cas localisés où le sol s'est développé aux dépens de formations magnétiques, l'allure de la variation de la susceptibilité avec la profondeur ne semble pas dépendre de la nature minéralogique de la roche-mère; les propriétés magnétiques des différentes couches du sol sont également assez indépendantes de leur concentration en fer total.

Les valeurs observées sur plusieurs centaines d'échantillons prélevés dans diverses régions de France et des Territoires d'Outre-mer (chap. V) montrent que, si la susceptibilité est très variable d'un sol à l'autre, la végétation et la culture n'ont pas d'influence appréciable sur les propriétés magnétiques de l'horizon humifère supérieur. Le rôle de la roche-mère ne se manifeste que dans la mesure où ses produits d'altération sont eux-mêmes magnétiques. Seules les conditions d'humidité paraissent avoir une influence déterminante: les susceptibilités les plus élevées correspondent à des sols relativement secs tandis que les susceptibilités les plus faibles correspondent à des sols très humides.

En vue de déterminer la nature des constituants responsables de la susceptibilité magnétique du sol, j'ai procédé d'abord à différents fractionnements (chap. VI). Un premier fractionnement effectué à l'aide d'un aimant sur quelques sols bretons a montré que la partie attirable comprenait, à côté de grains de magnétite et d'ilménite, des fragments de minéraux et de roches, normalement peu magnétiques, rendus sensibles à l'action de l'aimant, soit par un enduit magnétique, soit par une transformation profonde. Ce triage grossier ne sépare qu'une partie relativement faible des constituants magnétiques du sol; pour provoquer la dispersion des particules minérales, j'ai employé les procédés de l'analyse mécanique des sols. Après destruction des matières organiques et dispersion des agrégats, les échantillons de terre ont été fractionnés par sédimentations successives pour séparer les "argiles", diamètre inférieur à $2\ \mu$, les "limons", diamètre compris entre $2\ \mu$ et $20\ \mu$, et les "sables", diamètre compris entre $20\ \mu$ et $2\ \text{mm}$. Lorsqu'on mesure la susceptibilité des différentes fractions ainsi recueillies, on constate que la susceptibilité de la fraction "argiles", est généralement beaucoup plus élevée, de cinq à dix fois, que celle des autres fractions. Cette répartition des susceptibilités entre les différentes fractions n'est modifiée que si le sol s'est formé sur des roches-mères dont les produits d'altération sont magnétiques; dans ce cas, des minéraux magnétiques provenant de la roche-mère peuvent conférer à la fraction "sables", la susceptibilité la plus élevée.

La viscosité magnétique, particulièrement marquée avec les "argiles", est également très nette avec les autres fractions.

Dans le chapitre VII, j'ai étudié, sur quelques exemples, la variation de la susceptibilité des roches lorsqu'elles s'altèrent en l'absence de matières organiques. Dans ces conditions, l'altération des combinaisons ferrugineuses présentes dans les roches conduit, le plus souvent, à la formation d'un sesquioxyde peu magnétique et la susceptibilité globale des roches tend à diminuer. Les silicates ferro-magnésiens semblent particulièrement sensibles à cette altération tandis que la magnétite et l'ilménite résistent mieux et persistent dans les produits d'altération. Des variations de concentration, consécutives à la migration des éléments les plus mobiles, peuvent entraîner une accumulation de ces deux minéraux dans certaines zones où la susceptibilité devient ainsi supérieure à celle de la roche fraîche.

Le comportement magnétique de ces produits d'altération est très différent de celui des sols : la susceptibilité la plus élevée appartient à la fraction «sables» et la viscosité magnétique est peu marquée pour les différentes fractions.

Les minéraux magnétiques provenant de la roche-mère n'ont, en général, qu'une faible responsabilité dans les propriétés magnétiques de la couche superficielle du sol ; celles-ci sont dues essentiellement à une combinaison ferrugineuse magnétique qui ne se développe que dans l'horizon humifère supérieur.

L'identification de ce constituant par voie directe est difficile à cause de sa faible concentration, même dans les argiles les plus magnétiques (chap. VIII). Une première comparaison entre les propriétés de ce constituant et celles des composés du fer que l'on pourrait trouver dans le sol m'a conduit à limiter le choix entre les combinaisons possibles, à deux oxydes : Fe_3O_4 et $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$: les autres combinaisons, telles que les ferrites, ont été écartées soit parce que leur susceptibilité est trop faible, soit parce que leur formation, en quantité suffisante, semble incompatible avec les conditions du milieu naturel, soit enfin parce que leurs propriétés ne concordent pas avec celles du constituant magnétique du sol.

L'analyse thermique différentielle de la fraction argileuse, la viscosité que cette fraction manifeste lorsqu'elle est soumise à l'action d'un champ magnétique, l'analogie entre le comportement des «argiles» du sol et celui des produits obtenus par la précipitation simultanée d'un sel ferreux et d'un sel ferrique, produits constitués essentiellement par l'oxyde cubique, conduisent à attribuer les propriétés magnétiques de la fraction argileuse du sol à une combinaison du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ stabilisé. Si l'on ne peut pas exclure la présence d'une faible quantité de magnétite, celle-ci n'a pas d'influence notable sur la susceptibilité globale.

Au cours de l'altération qui se poursuit dans l'horizon humifère, la transformation des minéraux se traduit pour les débris de la roche-mère par une augmentation de la susceptibilité (chap. IX). Etant donné les conditions dans lesquelles ces fragments de roches deviennent magnétiques et le traînage qu'ils présentent, on peut admet-

tre que leurs propriétés sont dues, comme celles des «argiles», à une combinaison du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

On trouve ainsi dans la fraction «sables» du sol, en proportions variables : d'une part, des minéraux magnétiques de la roche-mère qui ont subsisté sous leur forme initiale, d'autre part, des fragments altérés de cette roche qui ont acquis au contact du sol des propriétés nouvelles.

Les «limons», dont le comportement est semblable à celui des «sables», ont les mêmes constituants.

Sauf dans le cas où le sol s'est développé sur une formation contenant une proportion notable de minéraux magnétiques, les propriétés magnétiques ne se manifestent que dans la couche superficielle, riche en matières organiques ; d'autre part dans les sols très humides elles sont généralement très faibles.

Des travaux récents ont montré que l'évolution du fer dans le sol est liée à des phénomènes de fermentation qui favorisent la dissolution et la migration de cet élément. La méthode expérimentale utilisée au cours de ces travaux, qui consiste à activer les fermentations par une solution sucrée, a permis de modifier les propriétés magnétiques du sol dans des délais relativement courts (chap. X) : la susceptibilité diminue lorsque la fermentation crée un milieu réducteur permettant la solubilisation et la migration du fer ; on a observé, au contraire, une augmentation de la susceptibilité dans quelques cas où le milieu réducteur provoque un remaniement du fer sans entraînement notable.

Ces résultats expliquent les observations faites sur les sols humides ; ils permettent, en outre, d'interpréter la formation d'une combinaison magnétique dans le sol par des phénomènes d'oxydo-réduction qui ont pour résultat de faire passer le fer à l'état de $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

Le comportement du sol au point de vue magnétique dépend ainsi de l'activité des fermentations des matières organiques et de l'humidité du milieu.

Il est probable que, dans l'horizon humifère, l'oxyde cubique, $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, se forme, non par une précipitation simultanée des ions Fe^{++} et Fe^{+++} , mais par une réduction des composés ferriques, suivie d'une réoxydation, sans déplacement du fer. Au cours de cette évolution le fer passe vraisemblablement par la forme Fe_3O_4 , ce qui expliquerait l'obtention de l'oxyde $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, dont la structure cristalline est voisine de celle de la magnétite. On peut remarquer que ce mécanisme est analogue à celui qui est utilisé pour préparer l'oxyde cubique : réduction de $\text{Fe}_2\text{O}_3\alpha$ pour obtenir la magnétite, puis oxydation de la magnétite pour la transformer en $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

L'influence des propriétés magnétiques du sol sur les éléments du champ terrestre (chapitre XI) est généralement négligeable, mais elle devient sensible au voisinage d'une discontinuité dans un horizon humifère de forte susceptibilité : la composante verticale du champ

peut alors subir des variations de quelques dizaines de gamma, et il convient d'en tenir compte lorsqu'on étudie les anomalies magnétiques dans une région faiblement perturbée.

Il résulte de cette étude que la couche superficielle du sol présente souvent une susceptibilité magnétique élevée. A l'exception des cas localisés où le sol s'est développé sur des formations riches en minéraux magnétiques les propriétés magnétiques du sol ne sont pas dues à des minéraux provenant de la roche-mère, mais à une combinaison ferrugineuse, probablement du type $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$.

Cette combinaison apparaît seulement dans l'horizon humifère et sa formation, provoquée par des phénomènes d'oxydo-réduction favorisés par la fermentation des matières organiques, dépend des conditions du milieu naturel.

Parmi ces conditions, l'humidité joue un rôle important et la répartition des susceptibilités dans la couche superficielle d'un terrain permet de distinguer les zones qui demeurent très humides pendant une longue période de l'année.

Dans un profil, la susceptibilité varie d'un horizon à l'autre, indépendamment de la concentration en fer total : la comparaison des susceptibilités des différentes couches fournit des renseignements sur l'état de développement du sol ; en particulier, l'examen des propriétés magnétiques est susceptible de trouver une application dans les recherches sur les sols latéritiques qui couvrent des étendues considérables dans les régions tropicales, et dont la formation est très complexe.

Les propriétés magnétiques du sol sont étroitement liées aux conditions de son évolution ; une étude systématique de la susceptibilité, dont la mesure se fait rapidement au moyen d'un magnétomètre, peut apporter une aide efficace aux pédologues.

Bibliographie

- 1 — Abraham H. et Planiol R. C. R. Acad. Sc. (1925), 180, p. 1828.
- 2 — Anne P. Ann. Agro. (1945) p. 161.
- 3 — Benard J. Thèse Fac. Sc. Paris (1939); Ann. de Chimie (1939), 12, 5.
- 4 — Betremieux R. Thèse Fac. Sc. Paris (1951); Ann. Agro. (1951), 3, p. 198.
- 5 — Betremieux R. C. R. Acad. Sc. (1954), 288, p. 2257.
- 6 — Caillere Mlle S. et Henin S. Ann. Agro. (1951), 3, p. 414.
- 7 — Chaudron G. et Forestier H. C. R. Acad. Sc. (1925), 180, p. 1264.
- 8 — Chaudron G. et Girard, C. R. Acad. Sc. (1931), 192, p. 87 et C. R. Acad. Sc. (1933), 196, p. 925.
- 9 — Chevallier R. C. R. Acad. Sc. (1925), 180, p. 1473.
- 10 — Chevallier R. C. R. Acad. Sc. (1927), 184, p. 674.
- 11 — Chevallier R. C. R. Acad. Sc. (1932), 194, p. 1327.
- 12 — Chevallier R. et Mathieu Mlle S. Ann. de Physique (1948), 18, p. 258.
- 13 — Chevallier R. J. de Physique (1951), 12, p. 172.
- 14 — Coulomb J. C. R. Acad. Sc. (1943), 216, p. 851.
- 15 — Deb B. C. J. Soil Sc. Oxford (1949), I, n° 1, p. 112 et (1950), I, n° 2, p. 212.
- 16 — Demolon A. et Bastisse E. Ann. Agro. (1936), 6, p. 805

- 17 — Demolon A. et Bastisse E. C. R. Acad. Sc. (1946), 223, p. 115
- 18 — Demolon A. Dynamique du sol, Edit. Dunod, Paris (1948).
- 19 — Demolon A. et Leroux D. Guide expérimental pour l'étude du sol, Edit. Gauthier-Villars, Paris (1952).
- 20 — Fairweather A., Roberts F. F. et Welch A. J. E. Reports on Progress in Physics (1952), vol. 15, p. 142.
- 21 — Forestier H. Thèse Fac. Sc. Paris (1925), Ann. de Chimie (1925), 109, p. 57.
- 22 — Forrer R. C. R. Acad. Sc. (1938), 207, p. 670.
- 23 — Garvin L. Taylor and Duane H. Reno, Geophysics (1948), 13, p. 163.
- 24 — Gottschalk V. Physics (1935), 6, p. 127.
- 25 — Grenet G. Thèse Fac. Sc. Paris (1930), Ann. de Physique (1930), 13, p. 268.
- 26 — Grenet G. C. R. Acad. Sc. (1933), 197, p. 746.
- 27 — Grenet G. Ann. de Géophysique (1944), I, p. 256.
- 28 — Guillaud C. J. de Physique (1951), 12, p. 239.
- 29 — Henin S. et Betremieux R. C. Acad. Sc. (1948), 227, p. 1893.
- 30 — Henin S. et Le Borgne E. C. R. Acad. Sc. (1853), 236, p. 736.
- 31 — Henin S., Robichet O. et Du Rouchet M. J. C. R. Sc. (1953), 237, p. 1437.
- 32 — Koenigsberger J. Zeit. für Geophys. (1930), 6, p. 190.
- 33 — Kondorsky E. J. Izvest. Akad. Nauk S. S. S. R., Ser. geogr. geofis. (1952), 5, p. 47.
- 34 — Le Borgne E. C. R. Acad. Sc. (1950), 231, p. 584.
- 35 — Le Borgne E. C. R. Acad. Sc. (1951), 233, p. 82.
- 36 — Le Borgne E. C. R. Acad. Sc. (1952), 235, p. 1042.
- 37 — Le Borgne E. C. R. Acad. Sc. (1954), 238, p. 2346.
- 38 — Lossaint P. C. R. Acad. Sc. (1954), 239, p. 187.
- 39 — Maurain C. C. R. Acad. Sc. (1924), 178, p. 508.
- 40 — Michel A. et Chaudron G. C. R. Acad. Sc. (1935), 201, p. 1191.
- 41 — Michel A. Thèse Fac. Sc. Paris (1937), Ann. de Chimie (1937), II, p. 317.
- 42 — Michel A. Chaudron G. et Benard J. J. de Physique (1951), 12, p. 189.
- 43 — Pouillard E. Thèse Fac. Sc. Lille (1949), Ann. de Chimie (1950), 5, p. 164.
- 44 — Roquet Mlle J. Thèse Fac. Sc. Paris (1954).
- 45 — Russell E. J. Soil conditions and plant growth, 8e édition, p. 498.
- 46 — Schneider E., Thellier E. Thellier Mme O. Ann. Géophys. (1948), 4, p. 15.
- 47 — Sherman G. D. et Kauchiro Y. Soil Science (1954), vol. 77, n° 1, p. 1.
- 48 — Snoek J. L. J. de Physique (1951), 12, p. 228.
- 49 — Sosman R. B. et Posnjak E. J. Acad. Sc., Washington (1925), 15, p. 329.
- 50 — Stephens M. F., Langston Benny and Richardson A. C. The Reduction-oxidation Process for the treatment of Taconites. American Institute of mining and metallurgical Engineers (1953).
- 51 — Thellier E. Thèse Fac. Sc. Paris (1938), Ann. I.P.G. Paris (1938), 16, p. 157.
- 52 — Thellier E. et Thellier Mme O. C. R. Acad. Sc. (1949), 228, p. 1956.
- 53 — Thellier E. J. de Physique (1951), 12, p. 205.
- 54 — Weiss P. Thèse Fac. Sc. Paris (1896), Edit. Carré.

(Manuscrit reçu le 22 mai 1955).

DEUXIÈME THESE

Propositions données par la Faculté

L'ÉTUDE DES ANOMALIES MAGNÉTIQUES DE LA BRETAGNE CENTRALE

Vu et approuvé :

Paris, le 25 Mars 1955

Pour le Doyen de la Faculté de Sciences
L'Assesseur

Robert LÉVY

Vu et Permis d'imprimer :

*Pour le Recteur de l'Académie
de Paris*

Le Vice Président du Conseil de l'Université
de Paris

G. DAVY

